DE L'ÉLECTRON AU MICROPROCESSEUR

COURS 8016

Les PUBLICATIONS DU QUÉBEC

Principes et composants du courant alternatif

Québec

Principes et composants du courant alternatif

DE L'ÉLECTRON AU MICROPROCESSEUR

COURS 8016

Les PUBLICATIONS DU QUÉBEC

Principes et composants du courant alternatif

Québec

Coordonnateur: Carmine D'Amato, prof.

Cet ouvrage a été préparé par la Direction des cours par correspondance, Gouvernement du Québec.

Le contenu de cette publication est la version française de «Electronics Technology» publiée sous licence des Écoles internationales d'enseignement par correspondance canadienne limitée et il a été rédigé par le ministère de l'Éducation.

Cette édition a été produite par Les Publications du Québec.

Tous droits de traduction et d'adaptation en totalité ou en partie réservés pour tous pays. Toute reproduction par procédé mécanique ou électronique y compris la microreproduction est interdite sans l'autorisation écrite d'un représentant dûment autorisé de la Direction générale des publications gouvernementales du ministère des Communications.

Dépôt légal — 4e trimestre 1986
Bibliothèque nationale du Québec
ISBN 2-551-08715-5
© Gouvernement du Québec, 1986

Introduction

Cet ouvrage est le deuxième volume de la collection DE L'ÉLECTRON AU MICROPROCESSEUR. Il est destiné aux étudiants qui ont déjà suivi le cours PRINCIPES DU COURANT CONTINU, c'est-à-dire 8015 (AF01), ou qui ont les connaissances équivalentes en courant continu.

La matière qui suit vous permettra de vous familiariser avec les circuits électriques en courant alternatif, la loi d'Ohm appliquée à ces derniers, la distribution électrique et le principe de fonctionnement de certains appareillages, tels que le transformateur et l'alternateur.

Les mathématiques que nous proposons sont réduites au strict minimum; cependant, quelques problèmes numériques requièrent l'utilisation des puissances de 10 de la racine carrée et quelques notions de trigonométrie (sinus, cosinus et tangente). Avec les calculatrices de poche, ces calculs se font en quelques secondes.

Le système utilisé est le Système International d'Unités (SI), mais les valeurs équivalentes dans le système impérial suivent entre parenthèses.

Le texte est clair, de lisibilité facile, exhaustif, dans la tradition pédagogique des cours par correspondance.

Ce cours renferme de nombreux exemples. À la fin de chaque chapitre, on trouve un mini-test avec corrigé et, à la fin de chaque module, un examen personnel, toujours avec corrigé. Ces épreuves facultatives vous permettront d'évaluer plus facilement vos progrès.

Cet ouvrage est abondamment illustré de dessins en deux couleurs et les parties du texte les plus significatives sont indiquées en rouges.

Le coordonnateur

Carmine D'Amato

Sommaire

8016 COURS AF02
Principes et composants du courant alternatif

AF0201	Courant alternatif	9
AF0202	Alternateurs	61
AF0203	Transformateurs	107
AF0204	Inductance et capacité	147
AF0205	Circuits à courant alternatif	183
AF0206	Redressement et dispositifs électroniques	209
AF0207	Distribution de l'énergie électrique	255
AF0208	Types de circuits électriques	295
	Index alphabétique	339

Courant alternatif

AF0201

Courant alternatif

Objectifs d'enseignement

Le présent cours a pour objet de vous expliquer à la fois la théorie de base et les applications pratiques du courant alternatif (c.a.), soit le courant qui nous fournit l'éclairage, le chauffage, les communications et autres commodités modernes. Un électricien d'usine compétent doit bien connaître le courant alternatif et savoir s'en servir.

A la fin du cours, vous devriez être en mesure:

- *De dessiner, sous forme de graphe, l'onde d'une tension de courant alternatif et de décrire brièvement comment une tension alternative est produite.*
- *D'expliquer ce qu'est un cycle de courant alternatif en utilisant les termes «alternance», «crête», «positif» et «négatif».*
- *De définir la durée d'un cycle de tension (exprimée en degrés).*
- *D'énumérer les valeurs caractéristiques d'un cycle et de décrire le rapport entre ces valeurs.*
- *De définir l'angle de phase et son rapport avec les circuits réactifs.*
- *De calculer la puissance de circuits monophasés et triphasés.*
- *De comprendre la relation des phases dans les circuits triphasés.*
- *De déterminer la puissance active par la lecture d'un cosinusphimètre.*
- *De décrire des montages en triangle et en étoile triphasés.*

Table des matières

Caractéristiques de base du courant alternatif

Utilisation du courant alternatif	13
Courant alternatif	13
Source de courant alternatif	15
Alternateur élémentaire	16
Cycle de la tension	17
Onde sinusoïdale	18
Un cycle de courant alternatif	19
Fréquence	20
Temps mesuré en degrés	21
Exercice de contrôle 1	22

Valeurs caractéristiques du cycle d'un c.a.

Valeurs caractéristiques	24
Valeurs instantanées	25
Valeurs maximale et crête-à-crête	26
Valeur moyenne	27
Valeur efficace	27
Importance de la valeur efficace	28
Problèmes d'application	30
Exercice de contrôle 2	31

Courant alternatif monophasé

Opposition au courant alternatif	32
Angle de phase	32
Angle de phase dans les circuits à c.a. résistifs	34
Angle de phase dans les circuits à c.a. réactifs	35
Puissance dans les circuits résistifs à c.a.	37
Puissance dans les circuits à c.a. purement réactifs	39
Puissance dans les circuits à c.a. partiellement réactifs	40
Puissance apparente dans un circuit à c.a.	41
Puissance active dans les circuits à c.a.	42
Application de la formule de la puissance	43
Facteurs de puissance dans l'industrie	44
Exercice de contrôle 3	46

Courant alternatif triphasé

Systèmes polyphasés	48
Circuits triphasés	49
Systèmes triphasés raccordés en étoile ou en triangle	50
Systèmes triphasés montés en triangle	51
Puissance dans les systèmes triphasés	52
Problème d'application	52
Exercice de contrôle 4	54

Examen personnel 56

Lexiques 58

Caractéristiques de base du courant alternatif

1 Utilisation du courant alternatif

Notre mode de vie moderne dépend de l'électricité : au travail comme pendant nos loisirs, nous utilisons des machines et des appareils électriques et la quasi-totalité des produits fabriqués font appel à l'électricité.

La plupart des appareils et machines électriques fonctionnent en courant alternatif. Le courant alternatif a permis d'étendre l'utilisation de l'électricité pour l'éclairage; la majorité des appareils ménagers et la plupart des moteurs industriels sont alimentés en courant alternatif; le son émis par la radio et la télévision, ainsi que l'image de cette dernière, sont produits par une certaine forme de courant alternatif. En raison de l'utilisation répandue de l'énergie électrique en c.a., c'est un domaine qu'il vous faudra connaître et dans lequel vous devrez être capable de travailler. Mais avant d'étudier les applications du courant alternatif, vous devez vous familiariser avec ses caractéristiques générales.

Le courant alternatif est un flux de particules chargées dont la direction est périodiquement inversée. Cette inversion de sens est provoquée par une f.é.m. (force électromotrice) variable ou *alternative* dans le circuit. **Dans ce module consacré au courant alternatif, nous ferons généralement référence, sauf indication contraire, au flux de courant conventionnel, c'est-à-dire au flux qui se déplace du pôle positif (+) vers le pôle négatif (−).**

2 Courant alternatif

Les principales raisons pour lesquelles l'utilisation du courant alternatif est si répandue sont le faible coût, de la production comme du transport, et la facilité de distribution.

L'alternateur ou génératrice de c.a., est une machine qui produit une tension alternative. Elle peut être construite pour produire des tensions et une puissance supérieures à celle de n'importe quelle génératrice de c.c. (courant continu) de mêmes dimensions. Par ailleurs, plus l'alternateur est grand, plus son rendement est élevé.

Il est relativement facile de produire une tension alternative élevée; il suffit d'élever la tension au moyen de transformateurs élévateurs et, finalement, de la transporter sur de longues distances au moyen de lignes qui desserviront l'endroit où elle sera utilisée. Par exemple, les génératrices de puissance électrique peuvent fournir une tension de 1300 V (volts) environ, soit 1,3 kV (kilovolt). Il suffit d'élever la tension à 500 kV pour le transport et finalement de l'abaisser à 120 V à l'emplacement des usines où elle sera utilisée. Il est souhaitable d'avoir une tension élevée sur la ligne de transport, car cela permet de réduire la perte de puissance sur la ligne.

Un courant faible haute tension transmet la même puissance qu'un courant élevé basse tension. Pendant le transport, des pertes de puissance se produisent, dues essentiellement à l'échauffement des conducteurs. La formule qui permet de calculer la perte de puissance due à l'échauffement des conducteurs est la suivante:

$$P = I^2 R$$

où P = perte de puissance, en watts
I = intensité, en ampères
R = résistance des conducteurs, en ohms

COURANT FAIBLE = FAIBLE PERTE DE PUISSANCE SUR LA LIGNE

Puisque la résistance de la ligne de transport est constante, *la perte de puissance sur cette ligne ou $I^2 R$ sera moindre si l'intensité du courant est plus faible;* par conséquent, il faut maintenir sur les lignes de transport un courant aussi faible que possible. Cela est possible lorsqu'on envoie sur la ligne la puissance électrique désirée, à très haute tension. Puisqu'on peut facilement élever la tension dans les circuits à c.a., le courant alternatif est beaucoup plus économique que le courant continu pour le transport de la puissance électrique.

Les transformateurs facilitent la distribution du courant alternatif. La haute tension acheminée par les lignes de transport est tout d'abord abaissée par les transformateurs. Puis, la puissance électrique ainsi «transformée» est transmise là où elle est requise, à une tension plus basse, plus sûre et plus commode, comme par exemple le 120 V couramment utilisé dans les circuits industriels d'usage général.

3 Source de courant alternatif

La plus grande partie du courant alternatif utilisé dans les foyers et dans l'industrie est produite par des *alternateurs* (ou génératrices de c.a.). Le fonctionnement des alternateurs repose sur le principe de l'induction électromagnétique. Comme vous l'avez appris, l'induction électromagnétique se produit dès qu'il y a mouvement relatif entre un conducteur et un champ magnétique. Par suite de l'induction électromagnétique, une tension est induite dans le conducteur. Et, si le conducteur est placé dans un circuit fermé, un courant circule dans ce conducteur.

La direction du courant conventionnel induit dans un conducteur par induction électromagnétique peut être déterminée par la règle de Fleming, dite de la *main droite*. Vous souvenez-vous de cette règle? Elle est expliquée par la figure 1. Voici comment vous pouvez l'appliquer. Tout d'abord avec la main droite, pointez l'index (le doigt qui sert à «montrer») dans la direction du champ magnétique inducteur. En même temps, pointez le pouce dans la direction où le conducteur se déplace dans le champ magnétique.

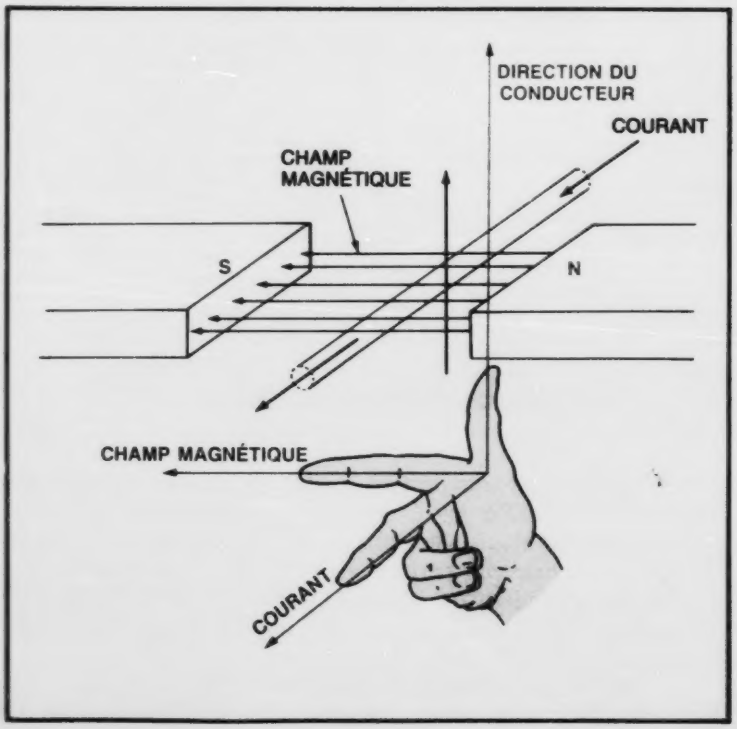
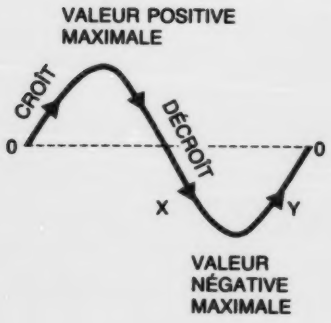


Fig. 1. Cette figure montre comment appliquer la «règle de la main droite». La direction dans laquelle le champ magnétique se déplace du pôle nord *N* vers le pôle sud *S* est indiquée par l'index. Le mouvement du conducteur vers le haut est indiqué par le pouce et la direction du courant conventionnel est vers vous, comme l'indique le majeur.

Votre pouce et votre index forment donc un angle droit. Placez maintenant votre majeur à angle droit par rapport au pouce et à l'index. Reportez-vous de nouveau à la figure 1 pour voir comment vos doigts doivent être placés. En suivant les directions, vous constaterez que votre majeur pointe vers la polarité positive (+) de la tension induite dans le conducteur. Et la direction est la même que celle du flux de courant conventionnel qui traverse le conducteur.

Dans un alternateur, un groupe de conducteurs tourne dans un champ magnétique. A cause de la position des conducteurs qui change continuellement par rapport aux lignes de force, la tension induite change ou alterne continuellement, et le courant fourni à la sortie de l'alternateur est un courant alternatif.



La valeur du courant à tout instant est appelée valeur *instantanée*. Les valeurs instantanées de tout courant alternatif varient, en direction et en quantité, à *intervalles réguliers*. Le courant croît, de la valeur zéro à une valeur maximale, valeur positive maximale, par exemple, puis revient à zéro; il croît à nouveau, mais dans la direction opposée, jusqu'à une valeur négative maximale, puis revient de nouveau à zéro. Une série de changements ou d'inversions de ce type, c'est-à-dire un changement de zéro à la valeur positive maximale, puis retour à zéro, et un autre changement de zéro à la valeur négative maximale, puis retour à zéro, correspond à ce que l'on appelle un *cycle*.

Dans un circuit à c.a., le courant n'est pas interrompu après un seul cycle. Les cycles se répètent sans cesse, car ils sont continuellement produits par l'alternateur (génératrice de c.a.). En d'autres termes, une tension ou un courant alternatif comprend un grand nombre de cycles.

4 Alternateur élémentaire

Voyons maintenant comment est produit un cycle de tension alternative. Pour simplifier les choses, nous «utiliserons» un *alternateur élémentaire*. Cet alternateur élémentaire comporte une seule bobine d'induction et un aimant permanent qui fournit les pôles inducteurs. Les alternateurs industriels sont dotés de nombreuses bobines et les pôles inducteurs sont fournis par des électro-aimants plutôt que par des aimants permanents.

Dans l'alternateur représenté sur la figure 2(a), le champ magnétique est créé par un aimant fixe en fer à cheval. La direction des

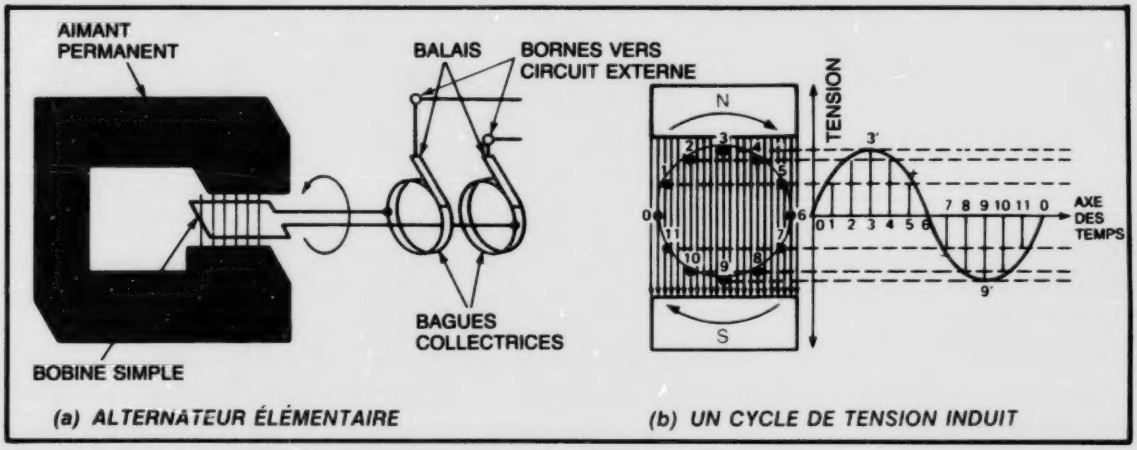


Fig. 2. Un tour de la bobine dans l'alternateur en (a) produit la variation de tension indiquée en (b). La ligne ondulée en (b) représente la tension alternative dans le circuit externe.

lignes de force magnétiques est indiquée par des flèches verticales, allant du pôle nord *N* de l'aimant au pôle sud *S*.

Une bobine simple est connectée à deux bagues collectrices. La bobine et les bagues sont montées sur un arbre (non représenté sur la figure) effectuant un mouvement de rotation grâce à une source externe de puissance mécanique. Lorsque l'arbre tourne, les côtés de la bobine coupent les lignes de force. Les balais en carbone sont maintenus dans une position fixe sur les bagues collectrices, connectant ainsi le circuit externe à la bobine.

5 Cycle de la tension

Vous trouverez sur la figure 2(b) la courbe de variation de la tension alternative au cours d'un cycle complet ainsi qu'une vue latérale de l'alternateur. Les positions du conducteur de l'alternateur au cours de la rotation sont numérotées de *0* à *11* dans la partie gauche de la figure (b). Les lignes de force sont indiquées par les lignes placées entre les pôles nord et sud, *N* et *S*.

Les valeurs instantanées de la tension au cours d'un cycle sont indiquées sur l'axe des temps, dans la partie droite de la figure 2(b). L'axe est divisé en autant de parties que le conducteur a de positions. Cette ligne, numérotée de *0* à *11*, avec fin du cycle en *0*, représente le temps nécessaire au conducteur pour effectuer un cycle. Les distances verticales au-dessus et au-dessous de l'axe des temps représentent les valeurs de la tension induite pour les positions correspondantes du conducteur.

Sur la figure 2(*b*), lorsque le conducteur se déplace au-delà de zéro, son mouvement est parallèle aux lignes de force, si bien

qu'aucune tension n'est induite dans le conducteur et que la tension est nulle au point *0* de l'axe des temps. Lorsque le conducteur dépasse la position *1* en coupant plusieurs lignes de force, une tension correspondante est induite. On trace une ligne horizontale en pointillé à partir de la position *1* du conducteur et parallèlement à l'axe des temps. La ligne verticale tracée à partir du point *1* de l'axe des temps vers la ligne horizontale en pointillé représente la tension induite à cet instant. À la position *2*, le conducteur coupe un plus grand nombre de lignes de force qu'à la position *1*. Par conséquent, la tension induite représentée par l'amplitude verticale au point *2* de l'axe des temps est plus élevée qu'au point 1.

Lorsque le conducteur dépasse la position *3*, son mouvement se fait perpendiculairement aux lignes de force et c'est là qu'il coupe le plus grand nombre de lignes. La tension induite en *3'* a, par conséquent, la plus grande valeur possible. À la position *4*, le nombre de lignes coupées par le conducteur diminue (il est le même qu'à la position *2*). Les tensions induites aux points *2* et *4* sont, par conséquent, égales.

À la position *5*, le nombre de lignes coupées par le conducteur est encore plus réduit et la tension induite est la même qu'à la position *1*.

Lorsque le conducteur atteint la position *6*, il ne coupe aucune ligne de force et la tension induite est nulle, comme au début du cycle. Les tensions induites de la position *0* à la position *6*, ont la même polarité. Par conséquent, elles sont toutes représentées par des amplitudes *au-dessus* de l'axe des temps, c'est-à-dire positives.

Lorsque le conducteur a dépassé la position *6*, les tensions induites ont une polarité opposée. Ces tensions sont, par conséquent, négatives et représentées par des amplitudes au-dessous de l'axe des temps. Les tensions ont des valeurs négatives croissantes lorsque le conducteur se trouve aux positions *7* à *9*. La tension négative maximale est atteinte en *9*, comme l'indique le point *9'* placé au-dessous de l'axe des temps. Puis les valeurs décroissent aux positions *10* et *11*, jusqu'à ce qu'une tension nulle soit induite à la fin d'un tour complet du conducteur.

6 Onde sinusoïdale

La ligne ou courbe ondulée qui relie l'ensemble des points représentant la tension pendant une période déterminée est appelée onde sinusoïdale. C'est la représentation graphique des variations de la tension alternative. L'onde sinusoïdale facilite l'étude des tensions et

des courants alternatifs. La figure 2(*b*) ne montre qu'une seule série d'inversions: cette série correspond à ce que l'on appelle un **cycle**. Mais l'onde sinusoïdale comprend de nombreux cycles. Ces cycles continuent de se reproduire, aussi longtemps que la tension est appliquée.

Dans un circuit à c.a., la tension comme le courant varient selon une sinusoïde. La figure 2(*b*) représente la courbe de la tension: les changements de sens du courant correspondent aux changements de polarité de la tension.

7 Un cycle de courant alternatif

Vous trouverez sur la **figure 3** le graphe d'un cycle de courant alternatif. L'axe horizontal est l'axe des temps exprimés en secondes. Dans cet exemple, la durée d'un cycle est de $\frac{1}{60}$ de seconde. Ainsi, dans une seconde, il y a 60 cycles.

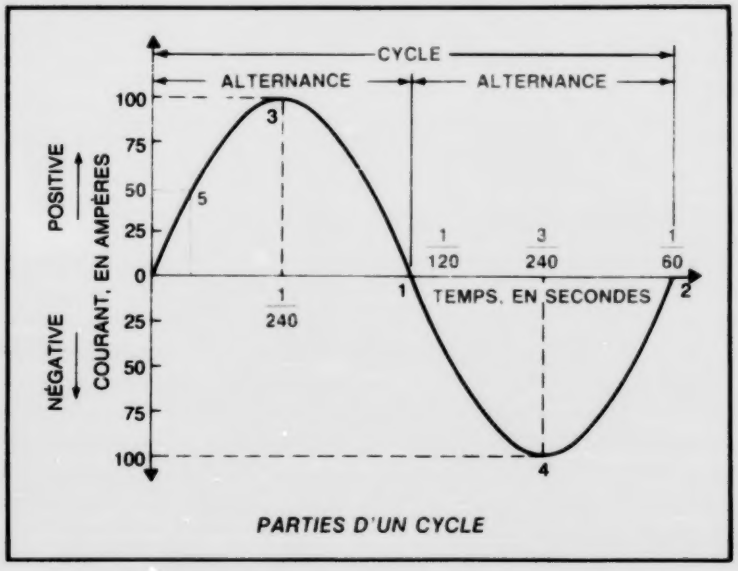


Fig. 3. Le cycle complet d'une onde sinusoïdale de 60 Hz (hertz) dure $\frac{1}{60}$ de seconde.

Essayez d'imaginer la rapidité des variations: soixante séries de changements sont effectuées toutes les secondes!

Sur la figure 3, vous observerez que les valeurs 0 du courant se situent au début du cycle, soit au point *0;* puis, $\frac{1}{120}$ de seconde après, au point *1*; et finalement à la fin du cycle, au point *2*. L'intensité du courant change à chaque instant. Les valeurs consécutives du courant sont représentées par les distances entre les points sur l'onde sinusoïdale et la ligne de référence horizontale (axe des temps). Les distances sont mesurées en ampères comme l'indique l'échelle verticale passant par le point *0*. Les valeurs au-dessus de l'axe hori-

zontal sont positives, celles au-dessous sont négatives. Le courant commence au point *0* et au point *5*, il a atteint une valeur de 50 A (ampères) dans la direction positive. Le courant atteint le point le plus haut dans la direction positive (100 A) au point *3*, soit $\frac{1}{240}$ de seconde après le début du cycle. Après ce point, l'intensité commence à décroître jusqu'à atteindre zéro au point 1. En ce point, le courant change de direction et commence à croître dans la direction opposée jusqu'à ce qu'il atteigne au point *4* sa valeur négative maximale, soit 100 A négatif. Cela se produit $\frac{3}{240}$ de seconde après le début du cycle. Dans le dernier quart du cycle, le courant reste négatif mais décroît graduellement jusqu'à zéro au point *2*.

Un demi-cycle, c'est-à-dire un changement de courant ou de tension d'un point zéro au point zéro suivant, est appelé alternance. Un cycle comprend deux alternances. La valeur la plus élevée qu'un courant ou qu'une tension peut atteindre dans un cycle est appelée *valeur de crête* ou *valeur maximale*.

8 Fréquence

Comme nous l'avons déjà dit, la direction du courant alternatif change continuellement. La vitesse de ce changement de direction est appelée fréquence. Puisque l'on appelle cycle une variation complète du courant alternatif, la fréquence représente le nombre de cycles effectués en une seconde. On mesure par conséquent la fréquence en cycles par seconde appelés *hertz*, en l'honneur d'un savant qui fut Prix Nobel de physique.

Pour le courant électrique, la fréquence la plus courante aux États-Unis et au Canada est de 60 Hz (hertz). Elle est presque exclusivement utilisée pour l'éclairage et la force électromotrice bien que certaines lignes de chemins de fer soient alimentées en courant alternatif à une fréquence de 25 Hz.

En Amérique du Sud et en Europe, on utilise couramment du courant alternatif à 50 Hz. Les plus hautes fréquences, comme le 400 Hz, commencent à être utilisées pour alimenter certaines machines et pour accroître le rendement des lampes fluorescentes. Le 400 Hz est également utilisé couramment dans les circuits électriques d'avion.

9 Temps mesuré en degrés

Les changements de courant ou de tension se produisent en quelques fractions de seconde. Mais le temps qui s'écoule pendant un cycle ne se mesure généralement pas en fractions de seconde, comme c'était le cas sur la figure 3. Au lieu de cela, il est beaucoup plus commode de mesurer le temps en degrés comme l'indique la **figure 4**.

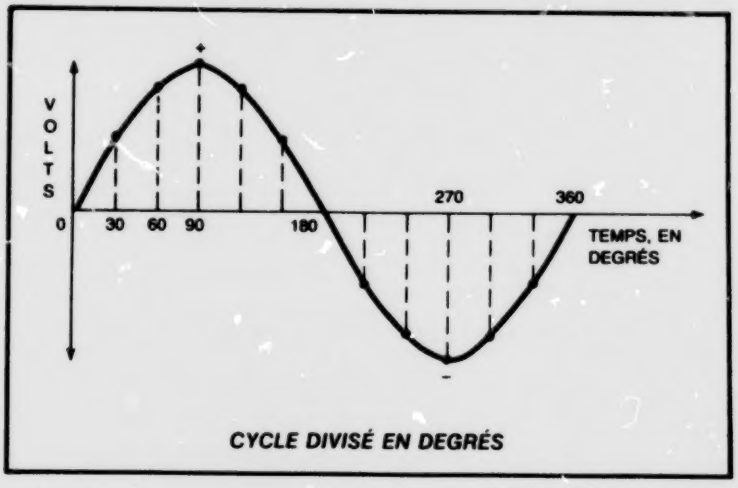


Fig. 4. Chacun des douze intervalles de temps représentés sur la figure 2(*b*) correspond à un intervalle de 30° (degrés) tel qu'indiqué pour ce cycle. Ainsi, le temps de 360° dans le cas d'un cycle complet correspond à un tour complet de la bobine.

Le temps nécessaire à l'accomplissement d'un cycle dépend de la vitesse de changement du courant ou de la fréquence, si on mesure le cycle en secondes. Cependant, si l'on ne connaît pas la durée d'un cycle en fractions de seconde, il est commode de représenter l'intervalle de temps en degrés. Sur la figure 4, l'onde sinusoïdale de la tension est représentée à une échelle convenable et la partie de l'axe des temps comprise entre le début et la fin du cycle de l'onde sinusoïdale est divisée en 360 segments égaux appelés «degrés» (ces degrés sont des unités de *temps*, et sont différents des degrés de température ou angulaires). Il importe peu de savoir quelle est l'échelle ou le temps effectivement représentés par l'intervalle: **l'intervalle nécessaire pour un cycle représente toujours 360° (degrés).**

Une alternance correspond à 180°, soit la moitié du temps nécessaire à l'accomplissement d'un cycle. Les valeurs nulles de la tension se trouvent à 0°, 180° et 360°, comme l'indique la figure 4. La valeur maximale positive est atteinte à 90° et la valeur maximale négative à 270°. Pour une valeur de la tension à tout autre instant, le nombre correspondant de degrés peut être déterminé sur l'axe horizontal des temps.

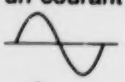
Exercice de contrôle 1

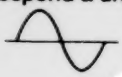
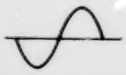
Vous allez maintenant faire une petite pause pour revoir quelques points-clés. Si vos réponses sont différentes des nôtres, vous trouverez l'explication en vous reportant à la section indiquée en face de chaque réponse.

Vos réponses

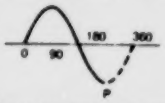
1. Dans votre usine, l'éclairage de secours peut être obtenu en utilisant comme source auxiliaire: 1. _____
   A. un transformateur. *C* un moteur.
   B. un alternateur. *D.* un isolateur.

2. Pour abaisser ou élever la tension d'un courant alternatif, vous pouvez utiliser: 2. _____
   A. un condensateur. *C.* un moteur.
   B. un transformateur. *D.* une terre.

3. Quelle est, parmi les figures représentées ci-dessous, celle qui correspond à un cycle de tension d'un courant alternatif? 3. _____
   A. *C.* 
   B. *D.*

4. Quelle est, parmi les figures représentées ci-dessous, celle qui correspond à une alternance de la tension d'un courant alternatif? 4. _____
   A.  *C.*
   B.  *D.*

5. Si l'onde sinusoïdale d'une tension de courant alternatif part de 0° pour atteindre le point P (indiqué sur la figure suivante par la partie en trait plein de l'onde sinusoïdale), combien de degrés électriques a-t-elle accomplis? 5. _____



Dans l'espace réservé en face de chaque groupe de mots de la colonne de droite, inscrivez la lettre correspondant à la phrase suivante qui l'explique le mieux.

6. *a.* Courant qui croît jusqu'à la valeur maximale, revient à zéro, croît de nouveau jusqu'à la valeur maximale (mais dans la direction opposée) et revient de nouveau à zéro (ce cycle se répète de manière continue).
   b. Graphe qui relie tous les points atteints par une tension de courant alternatif pendant une période.
   c. Nom que l'on donne au demi-cycle d'une tension de courant alternatif.
   d. Fournit le champ magnétique dans un alternateur commercial.
   e. Fournit le champ magnétique dans un alternateur élémentaire.

6. ___ Courbe d'onde sinusoïdale
   ___ Courant alternatif
   ___ Électro-aimant
   ___ Alternance
   ___ Aimant permanent

Voir les réponses à la page suivante.

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 1

1. B un alternateur Section 2
2. B un transformateur Section 2
3. C Sections 5, 7; figures 2, 3 (la seule figure qui représente un cycle complet d'inversions: une inversion négative et une inversion positive).
4. D Sections 5, 7; figures 2, 3
5. 270° Section 9

6. *b* Courbe d'onde sinusoïdale Section 6
   a Courant alternatif Section 3
   d Électro-aimant Section 4
   c Alternance Section 7
   e Aimant permanent Section 4

Valeurs caractéristiques du cycle d'un c.a.

10 Valeurs caractéristiques

Lorsque l'on a un circuit à c.c. (courant continu) de 5 A, un courant de 5 A circule continuellement dans le circuit: il n'en est pas de même pour un circuit à c.a. Les valeurs de la tension et du courant alternatifs varient à chaque instant. Par conséquent, il est nécessaire de déterminer un nombre caractéristique d'ampères et de volts qui sera utilisé dans la plupart des calculs. Ce nombre sera déterminé un peu plus loin dans le cours.

Cependant, nous allons tout d'abord examiner plusieurs valeurs caractéristiques de chaque cycle d'un c.a. Ces valeurs sont au nombre de cinq:

- Valeurs instantanées
- Valeurs maximales ou valeurs de crête
- Valeur crête-à-crête
- Valeur moyenne
- Valeur efficace du courant et de la tension

Nous examinerons en détail chacune de ces valeurs à l'aide du cycle de la tension représenté sur la **figure 5**.

Pour faciliter la compréhension, supposons que la tension maximale E_{max} soit égale à 1 V et que les autres valeurs caractéristiques soient déterminées par rapport à la tension maximale. Alors, nous constatons que la tension efficace E est égale à 0,707 V, que la tension moyenne E_{moy} est égale à 0,636 V et que la tension crête-à-crête est égale à 2 V. Les rapports numériques des valeurs sont indiqués au-dessous du cycle.

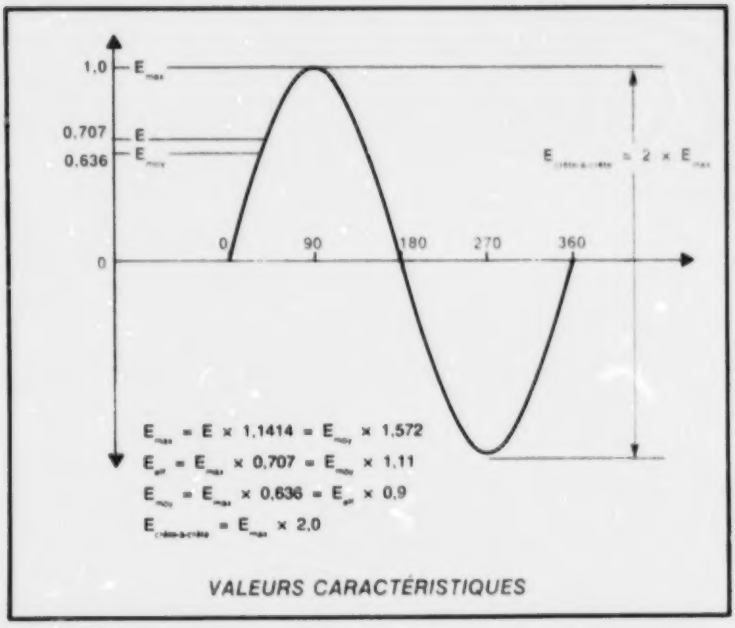


Fig. 5. Un point quelconque pris sur l'onde sinusoïdale représente une valeur instantanée de la tension. Les autres valeurs caractéristiques sont indiquées comme suit: valeur maximale E_{max}, valeur efficace E_{eff}*, valeur moyenne E_{moy} et valeur crête-à-crête $E_{crête-à-crête}$.

* Généralement la valeur efficace est indiquée par les lettres E ou V, sans indices.

11 Valeurs instantanées

La *valeur instantanée* est la valeur réelle du courant ou de la tension à un moment donné. En électronique, il est parfois nécessaire de tenir compte des valeurs instantanées. Sur la **figure 6**, les valeurs instan-

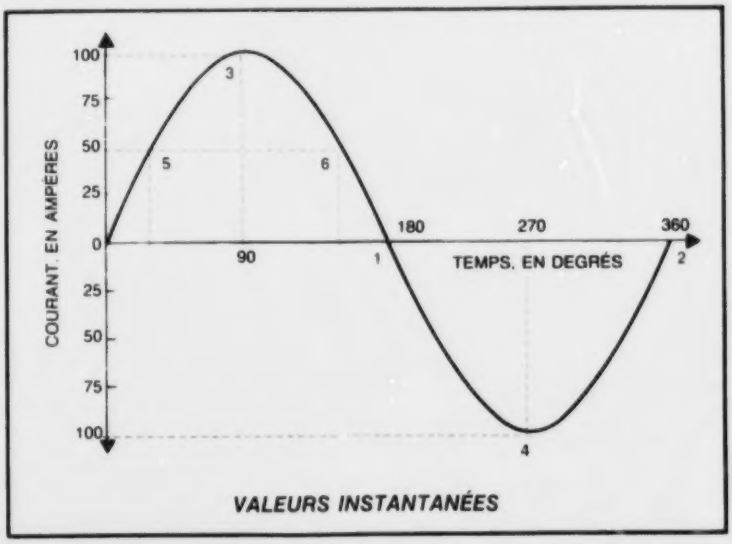


Fig. 6. Aux points *0*, *1*, et *2*, la valeur instantanée du cycle est de 0 ampère. Au point *3*, la valeur instantanée est égale à la valeur *positive* maximale (100 A); au point *4*, elle est égale à la valeur *négative* maximale (100 A également, mais dans la direction opposée). La valeur instantanée aux points *5* et *6* est de 50 A.

tanées sont représentées par des distances verticales entre les points de l'onde sinusoïdale et l'axe des temps ou ligne de référence horizontale. On peut lire ces valeurs d'après l'échelle placée sur la ligne verticale. Les valeurs instantanées d'un courant alternatif varient à chaque instant. Dans ce cours, on ne les utilise pas dans les calculs, bien qu'elles servent parfois à préciser les conditions d'un circuit à un moment donné.

12 Valeurs maximale et crête-à-crête

La *valeur maximale* ou *valeur de crête* est la valeur instantanée la plus élevée d'un courant ou d'une tension atteinte dans l'une ou l'autre direction au cours d'un cycle. Un cycle comprend deux valeurs maximales: une valeur maximale positive et une valeur maximale négative.

La *valeur maximale du courant* dans un circuit à c.a. est importante lorsqu'il s'agit de choisir un conducteur de calibre suffisant pour transporter le courant. Lorsque l'on sélectionne l'isolant d'un conducteur, il faut prendre en considération la *valeur de la tension maximale*.

La *valeur crête-à-crête* est la variation du courant ou de la tension entre la valeur maximale positive et la valeur maximale négative, comme le montre la **figure 7**. Par exemple, si le courant maximal est de 100 A, sa valeur crête-à-crête sera de 200 A. Pour une tension ou un courant d'onde sinusoïdale, la valeur crête-à-crête est égale à deux fois la valeur maximale (ou de crête). La valeur

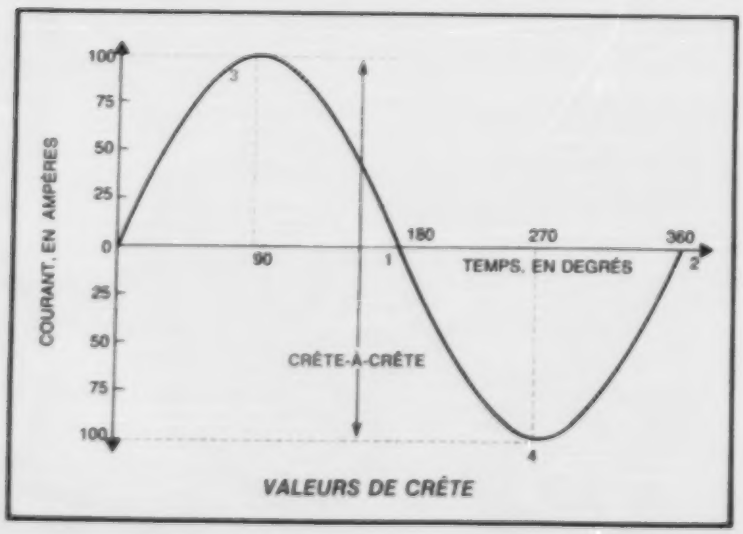


Fig. 7. Les deux valeurs maximales de cette onde se trouvent aux points *3* et *4*. La valeur crête-à-crête est la différence entre les deux valeurs maximales, qui sont des valeurs instantanées particulières.

crête-à-crête est aussi égale à la somme des deux valeurs maximales (en ne tenant pas compte du fait que l'une est positive et l'autre négative). La valeur crête-à-crête d'une onde de tension se mesure facilement au moyen d'un instrument appelé oscilloscope. Les ingénieurs et les techniciens de la télévision se servent toujours des valeurs crête-à-crête.

13 Valeur moyenne

On obtient la valeur *moyenne* de la tension ou du courant (courant alternatif) en calculant la moyenne de toutes les valeurs instantanées pendant une alternance. La moyenne n'est pas établie sur l'ensemble du cycle parce que comme la somme de toutes les valeurs positives annule la somme de toutes les valeurs négatives, on obtiendrait une moyenne de zéro. Les valeurs moyennes sont calculées d'après les formules suivantes:

$$I_{moy} = 0{,}636 \times I_{max} \qquad (1)$$

et

$$E_{moy} = 0{,}636 \times E_{max} \qquad (2)$$

où: I_{moy} = valeur moyenne du courant, en ampères
I_{max} = valeur maximale du courant, en ampères
E_{moy} = valeur moyenne de la tension, en volts
E_{max} = valeur maximale de la tension, en volts

Par exemple, dans le cycle représenté sur les figures 6 et 7, la valeur moyenne du courant est égale à 0,636 × 100, soit 63,6 A. La valeur moyenne n'apparaît pas sur la courbe parce qu'elle ne correspond pas à la valeur moyenne des valeurs instantanées; elle s'obtient par un calcul relativement compliqué.

Certains appareils de mesure électrique réagissent proportionnellement à la valeur moyenne, mais sont conçus et étalonnés pour indiquer la valeur efficace.

14 Valeur efficace

La valeur efficace du courant ou de la tension (courant alternatif) est la valeur qui produit le même effet calorifique qu'une tension ou un courant continu connus. Par exemple, si un courant

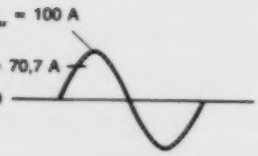
alternatif indéterminé a la même puissance calorifique qu'un courant continu de 10 A, on sait que le courant alternatif a une valeur efficace de 10 A. Lorsque l'on connaît la valeur maximale, on peut déterminer la valeur efficace d'après les formules suivantes:

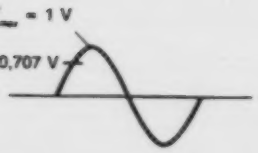
$$I_{eff} = 0{,}707 \times I_{max} \quad (1)$$

et

$$E_{eff} = 0{,}707 \times E_{max} \quad (2)$$

où: I_{eff} = valeur efficace du courant, en ampères
I_{max} = valeur maximale du courant, en ampères
E_{eff} = valeur efficace de la tension, en volts
E_{max} = valeur maximale de la tension en volts





On utilise le courant efficace pour calculer la puissance. Lorsqu'on a déterminé, à la section 2, la perte de chaleur dans la ligne de transport d'après la formule $P = I^2R$, c'est la valeur efficace du courant que nous avons utilisée.

La valeur efficace n'était indiquée ni sur la figure 6, ni sur la figure 7, parce qu'elle n'est pas l'une des valeurs instantanées. Pour le courant de la figure 7, la valeur efficace est égale à 0,707 × 100, soit 70,7, soit encore sept-dixièmes environ de la valeur maximale. La valeur efficace de la tension sur la figure 5 est égale à 0,707 V.

Lorsqu'on connaît déjà les valeurs efficaces du courant et de la tension, on peut déterminer les valeurs maximales d'après les formules suivantes:

$$I_{max} = \frac{I_{eff}}{0{,}707} = 1{,}414 \times I_{eff} \quad (3)$$

et

$$E_{max} = \frac{E_{eff}}{0{,}707} = 1{,}414 \times E_{eff} \quad (4)$$

Ces formules indiquent que les valeurs maximales sont égales au produit de 1,414 par les valeurs efficaces.

15 Importance de la valeur efficace

Lorsque l'on mesure un courant continu, un flux de courant constant traverse l'appareil de mesure et cette intensité est indiquée sur l'échelle du dispositif. Cette méthode de mesure ne peut être appliquée au courant alternatif. Comme le courant alternatif varie tout le temps, on ne peut mesurer directement son intensité; seuls ses *effets* peuvent être mesurés.

L'effet le plus fiable est la *chaleur* produite par le courant parce que la quantité de chaleur dépend de l'intensité du courant et ne dépend pas de la direction du flux. Par conséquent, si un courant alternatif produit la même quantité de chaleur qu'un courant continu donné, nous savons que sa valeur efficace est égale à la valeur du courant continu.

La figure 8 montre une onde sinusoïdale représentant un courant alternatif d'une valeur maximale de 20 A. La valeur efficace de ce courant est égale à 0,707 × 20, soit 14,14 A. Le courant alternatif produit la même quantité de chaleur dans le conducteur que le courant continu constant de 14,14 A représenté par la ligne horizontale. Il y a des moments où le courant alternatif est supérieur à 14,14 A et d'autres moments où aucun courant ne passe, mais **l'effet global** du changement de courant est le même que l'effet produit par le flux constant du courant continu.

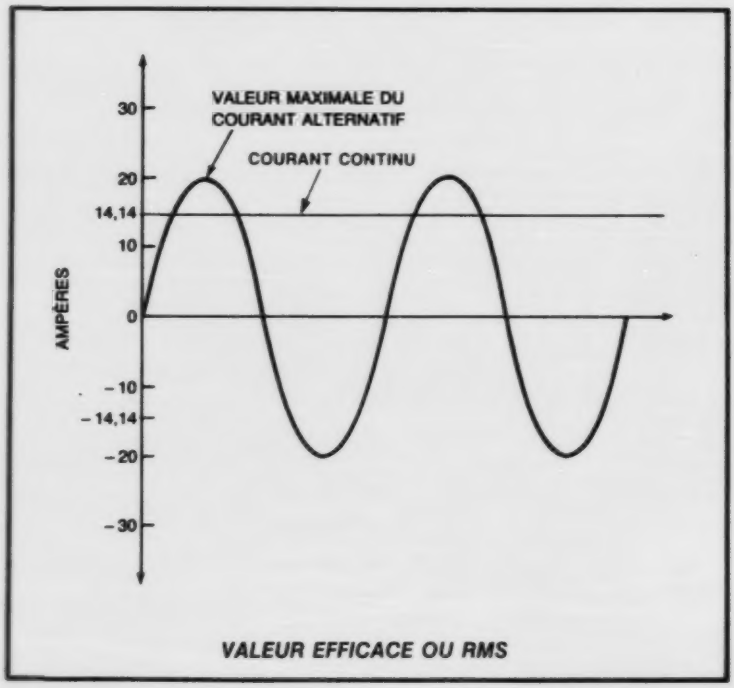


Fig. 8. La ligne horizontale placée à une distance de 14,14 A de l'axe des temps, indique un flux constant de courant continu. Ce flux constant de courant continu produit la même quantité de chaleur que le courant alternatif représenté par une onde sinusoïdale et dont la valeur maximale est de 20 A.

Les valeurs efficaces du courant et de la tension sont utilisées dans les calculs des circuits à c.a. On admet en pratique, sauf indication contraire, qu'il s'agit de valeurs efficaces lorsqu'on mentionne *n'importe* quelle valeur dans des applications du c.a. Par

exemple, pour un circuit à c.a. transportant 20 A sous 230 V, nous savons que la valeur efficace du courant est de 20 A et que celle de la tension est de 230 V. La plupart des appareils de mesure du courant alternatif sont conçus pour indiquer la valeur efficace de la quantité électrique mesurée.

En dehors du terme *valeur efficace*, il existe un autre terme de même sens — couramment utilisé pour désigner les courants alternatifs. Il s'agit de la valeur r.m.s. de l'anglais «root-mean-square» qui signifie la racine carrée de la moyenne des carrés des intensités instantanées durant un cycle. L'échelle d'un grand nombre d'appareils de mesure des tensions et des courants alternatifs comporte l'indication TENSION R.M.S. ou COURANT R.M.S.. N'oubliez pas que:

Valeur efficace = valeur r.m.s.

Problèmes d'application

Tout au long du cours, vous trouverez une section consacrée à un ou à plusieurs problèmes d'application qui illustrent clairement l'application d'un principe, d'une règle ou d'une formule. Lisez attentivement chaque problème et étudiez-en la solution jusqu'à ce que vous ayez parfaitement compris.

Problème 1. La valeur maximale d'un courant alternatif est de 15 A. Quelle est la valeur moyenne de ce courant?

Solution. D'après la formule 1 de la section 13, la valeur moyenne du courant est:

$$I_{moy} = 0{,}636\ I_{max} = 0{,}636 \times 15 = 9{,}54\ \text{A}$$

Problème 2. Une perceuse électrique est généralement alimentée en 120 V. Quelle est la valeur maximale de la tension c.a.?

Solution. La tension donnée est la tension efficace. D'après la formule 4 de la section 14, la valeur maximale est égale à:

$$E_{max} = 1{,}414\ E = 120 \times 1{,}414 = 169{,}68 \text{ volts}$$

Problème 3. Lorsqu'un alternateur est raccordé à une charge de 10 Ω (ohms), il fournit un courant efficace de 10 A. Quelle est la puissance calorifique fournie par le générateur?

Solution. Puisque le courant efficace est la quantité utilisée dans la formule relative à la puissance, tel qu'expliqué à la section 14, la puisance calorifique totale fournie par le générateur sera de:

$$P = R \times I^2 = 10^2 \times 10$$
$$= 10 \times 10 \times 10$$
$$= 1000 \text{ W (watts) ou } 1 \text{ kW (kilowatt)}.$$

Exercice de contrôle 2

Il est temps de faire une deuxième pause pour vérifier vos connaissances. Comparez vos réponses aux nôtres et, si nécessaire, révisez les sections citées en référence.

Vos réponses

1. La valeur instantanée est l'une des valeurs caractéristiques d'un cycle de c.a. Nommez les quatre autres valeurs caractéristiques.

   1. _____
   _____
   _____
   _____

2. Combien de valeurs maximales ou de crêtes y a-t-il dans un cycle de c.a.?
   A. 1
   B. 2
   C. 3
   D. 4

   2. _____

3. Vrai ou faux? La valeur crête-à-crête d'une onde sinusoïdale (ou d'un courant alternatif) est égale à deux fois sa valeur maximale?

   3. Vrai Faux
   (Encerclez votre choix)

4. «Un circuit à c.a. transporte un courant de 30 A sous 230 V». Cette phrase signifie que le courant a une valeur _____ de 30 A.
   A. efficace
   B. moyenne
   C. crête-à-crête
   D. instantanée

   4. _____

Dans l'espace réservé en face de chaque valeur caractéristique du c.a. dans la colonne de droite, inscrivez la lettre correspondant à la phrase suivante qui l'explique le mieux.

5. *a.* A le même effet calorifique qu'une valeur connue de courant continu.
   b. Est égale à la moyenne de toutes les valeurs instantanées pendant une alternance.
   c. Est la valeur la plus élevée atteinte dans l'une ou l'autre direction au cours d'un cycle.
   d. Changement de courant de la valeur maximale positive à la valeur maximale négative au cours d'un cycle.

   5. ___ Valeur moyenne
   ___ Valeur maximale ou de crête
   ___ Valeur crête-à-crête
   ___ Valeur efficace

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 2

1. Valeurs maximales ou de crête
   Valeur crête-à-crête
   Valeur moyenne
   Valeur efficace Section 10
2. B. 2 Section 12
3. Vrai Section 12
   (1 positive et 1 négative)
4. A. efficace Section 15
5. *b* Valeur moyenne Section 13
   c Valeur maximale ou de crête Section 12
   d Valeur crête-à-crête Section 12
   a Valeur efficace Section 14

Courant alternatif monophasé

16 Opposition au courant alternatif

On appelle *circuit à c.a. monophasé* un circuit à c.a. simple dans lequel une tension est appliquée. Si deux, trois ou plusieurs tensions c.a. sont appliquées dans des circuits interconnectés, on parle alors de «circuit à c.a. polyphasé» («poly» signifie «multi»). Nous parlerons d'abord des circuits à c.a. monophasés.

Dans les circuits à c.c., la seule opposition au flux du courant est la *résistance*. Cependant, dans les circuits à c.a., on trouve, en plus de la résistance, une autre forme d'opposition au flux du courant. C'est ce qu'on appelle la *réactance*. La réactance est soit inductive, soit capacitive selon la valeur de l'inductance et de la capacité dans le circuit.

L'opposition globale au courant alternatif est appelée impédance. L'*impédance* représente l'effet combiné de la résistance, de la réactance inductive, le cas échéant, et de la réactance capacitive, s'il y a lieu. (Il se peut que l'impédance d'un circuit à c.a. ne comporte aucune réactance, ou un seul type de réactance ou encore les deux types de réactance.)

Dans la pratique néanmoins, il y a toujours une certaine résistance dans un circuit à c.a. Par ailleurs, un circuit comportant des réactances est appelé *circuit réactif*.

17 Angle de phase

Dans tout circuit à c.a., il faut tenir compte de l'onde du courant, de l'onde de la tension et de leur rapport entre elles. Il est très rare que la tension et le courant atteignent, au même moment, leur valeur positive maximale, leur valeur zéro et leur valeur négative maximale.

En d'autres termes, l'onde de tension est rarement en phase avec l'onde de courant. Il se produit généralement un retard, soit de l'onde de tension, soit de l'onde de courant, selon les caractéristiques du circuit. Lorsque ce retard se produit, on dit que la tension et le courant sont déphasés.

Sur la **figure 9(*a*)**, on constate que l'onde de courant est déphasée ou en avance par rapport à l'onde de tension dans le circuit. La distance entre leurs points zéro est mesurée en degrés-temps. Cette amplitude exprimée en degrés représente la différence de phase appelée *angle de phase*. Le symbole usuel de l'angle de phase est θ (thêta en grec). Sur la figure 9(*a*), l'angle de phase est de 90°, le courant étant en avance sur la tension.

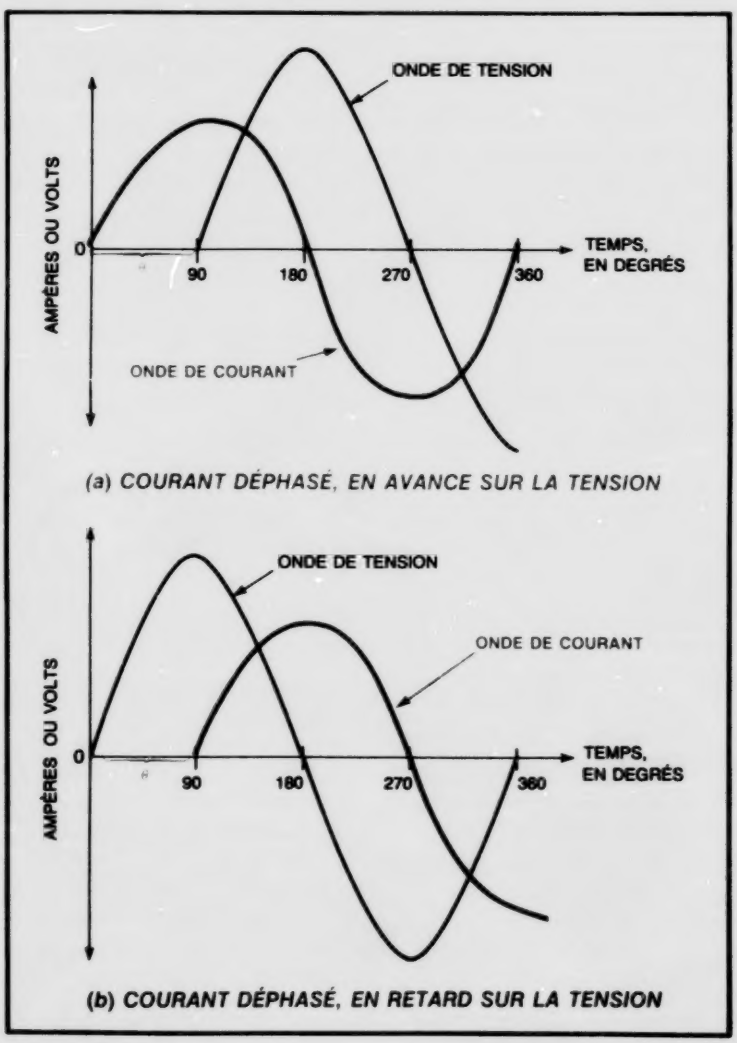


Fig. 9. L'onde de tension en (*a*) commence au point maximal de l'onde de courant, ce qui signifie que le courant est en avance sur la tension. L'onde de tension en (*b*) a déjà atteint son point maximal lorsque l'onde de courant commence, ce qui signifie que l'onde de courant est en retard sur la tension.

Examinons maintenant un cycle de l'onde de courant représentée en (*a*). Au point 0°, le courant commence à croître, et atteint sa valeur positive maximale à 90°, lorsque la valeur de l'onde de tension est zéro. À 180°, le courant décroît jusqu'à zéro et l'onde de tension atteint sa valeur maximale. À 270°, le courant atteint sa valeur négative maximale et la tension, sa valeur zéro. À 360°, le courant a effectué un cycle et a atteint la valeur zéro alors que la tension atteint sa valeur négative maximale. Cette séquence se poursuit, l'onde de courant du circuit étant toujours en avance de 90° ou en avance d'un quart de cycle sur l'onde de tension.

Les ondes de la figure 9(*b*) représentent la situation inverse, l'onde de courant ayant un *retard* de 90° sur l'onde de tension. Ainsi, l'angle de phase θ est égal à 90°, le courant étant en retard sur la tension. L'onde de courant commence lorsque l'onde de tension a déjà atteint sa valeur positive maximale.

En réalité, l'angle de phase dans les circuits est généralement très petit; les angles de phase sur les figures (*a*) et (*b*) représentent des déphasages extrêmes.

L'angle de phase joue un rôle très important lorsqu'il s'agit de calculer la puissance d'un circuit. Il permet de déterminer le *facteur de puissance* du circuit. Plus l'angle de phase est grand, plus le facteur de puissance du circuit, dont dépend la puissance active produite par le circuit, est faible; ce point sera expliqué ultérieurement dans le cours.

18 Angle de phase dans les circuits à c.a. résistifs

Lorsqu'un circuit à c.a. ne comprend qu'une seule charge résistive (telle qu'une lampe à incandescence, un élément chauffant ou une résistance), la seule opposition au courant est la résistance. Ce type de circuit est appelé circuit résistif. Le rapport entre l'intensité, la tension et la résistance est donnée par la loi d'Ohm, exactement comme pour les circuits à c.c. Rappelons que la loi d'Ohm est la suivante:

$$E = I \times R$$

Cette formule indique que la tension est égale à l'intensité multipliée par la résistance.

Dans le cas d'une charge purement résistive, les ondes de courant et de tension sont en phase, comme le montre la **figure 10**.

Les deux ondes commencent à zéro, atteignent leur valeur positive maximale en même temps, passent par le point zéro en même temps, atteignent leur valeur négative maximale en même temps et reviennent à zéro en même temps. Cela signifie que les deux ondes sont *en phase*. Dans un circuit purement résistif, il n'y a pas de déphasage entre l'onde de tension et l'onde de courant.

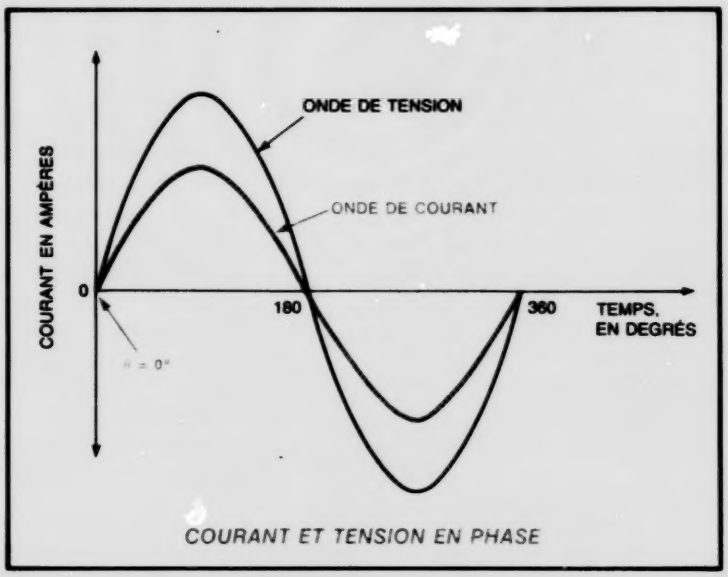


Fig. 10. Puisque les ondes de tension et de courant d'un circuit résistif sont *en phase*, le déphasage (ou angle de phase θ) est égal à 0.

19 Angle de phase dans les circuits à c.a. réactifs

Le cours consacré aux composants électriques a brièvement abordé la notion de *condensateur* et le principe de l'induction a été expliqué dans le cours sur le magnétisme. Le fonctionnement des dispositifs électriques appelés *inducteurs* repose sur le principe de l'induction. Les circuits dans lesquels se trouvent des condensateurs ou des bobines sont appelés respectivement «circuits capacitifs» et «circuits inductifs». Les condensateurs comme les bobines créent une opposition au courant alternatif.

L'opposition au courant alternatif créée par le condensateur est appelée *réactance capacitive*; l'opposition créée par une bobine est appelée *réactance inductive*. Un circuit à c.a. comprenant une réactance est appelé «circuit réactif». Lorsqu'un circuit à c.a. comprend une réactance et un condensateur ou un inducteur (ou les deux), la combinaison de la réactance et de la résistance est ce que l'on appelle «l'impédance».

Pour l'instant, nous allons essayer de mieux comprendre les effets de la réactance sur les ondes de tension et de courant d'un c.a. Les notions d'inductance et de capacité seront abordées en détail dans un autre cours du même module.

Dans un circuit réactif, le déphasage entre la tension et le courant est causé par l'inductance ou la capacité (ou leur combinaison). Dans un circuit à c.a., le courant est en *retard* sur la tension si le circuit contient principalement une réactance *inductive*; le courant est en *avance* sur la tension si le circuit contient principalement une réactance *capacitive*. Mais dans les deux cas, le courant et la tension, dans un circuit réactif, sont toujours déphasés.

Les ondes sinusoïdales de la figure 9(*a*) représentent les conditions de phase observées dans un circuit capacitif, tandis que les ondes sinusoïdales de la figure 9(*b*) représentent les conditions de phase observées dans un circuit inductif.

Dans un circuit capacitif, le courant est en avance sur la tension. On peut dire en d'autres termes que la tension est en retard sur le courant. Dans un circuit inductif, le courant est en retard sur la tension (ou encore, la tension est en avance sur le courant). Si cette notion vous semble à priori confuse, pensez aux mots:

ELI et *ICE*

E représente la tension
L est le symbole de l'inductance (ou d'un circuit inductif)
I représente le courant
C est le symbole de la capacité (ou d'un circuit capacitif).

Ainsi, *I* suit *E*, ce qui veut dire que le courant *I* est en retard sur la tension *E* dans un circuit inductif (*L*) et le courant *I* est en avance sur la tension *E* dans un circuit capacitif (*C*).

Dans la pratique, on dit généralement que le courant est en avance ou en retard sur la tension. Parfois, on ne mentionne même pas la tension et le courant: on dit par exemple que l'angle de phase est en «avance de 45°», ce qui veut simplement dire que le courant a une avance de 45° sur la tension.

20 Puissance dans les circuits résistifs à c.a.

On utilise la même méthode pour calculer la puissance dans un circuit à c.a. et dans un circuit à c.c., mais dans les circuits à c.a., les tensions et les courants varient et, parfois, les tensions et les courants sont déphasés. Il faut tenir compte de ces conditions et de ces rapports de phase variables lorsque l'on calcule la puissance alternative.

Tout d'abord, rappelons brièvement comment on calcule la puissance d'un circuit à c.c. Dans un cours précédent, vous avez appris que, dans un circuit à c.c., la puissance utilisée (entièrement consommée) était égale à la tension appliquée multipliée par l'intensité du courant circulant dans le circuit; c'est-à-dire:

$$P = E \times I$$

où P = puissance utilisée, en watts
E = tension appliquée, en volts
I = intensité du courant total, en ampères

Vous avez également appris que dans un circuit à c.c. classique, la tension et le courant avaient des valeurs stables. La puissance, dans un circuit à c.c., a également une valeur stable.

Dans un circuit à c.a., la puissance est aussi égale à la tension multipliée par l'intensité du courant. Mais, dans un circuit à c.a., la tension et le courant changent continuellement et, par conséquent, la puissance change d'un instant à l'autre. La puissance est alter-

native, comme la tension et le courant, et sa nature changeante peut être représentée par une onde sinusoïdale. La **figure 11** représente une onde de tension dont la valeur maximale est de 4 V et une onde de courant dont la valeur maximale est de 2 A. Le courant est en phase avec la tension, ce qui signifie que ce circuit est résistif.

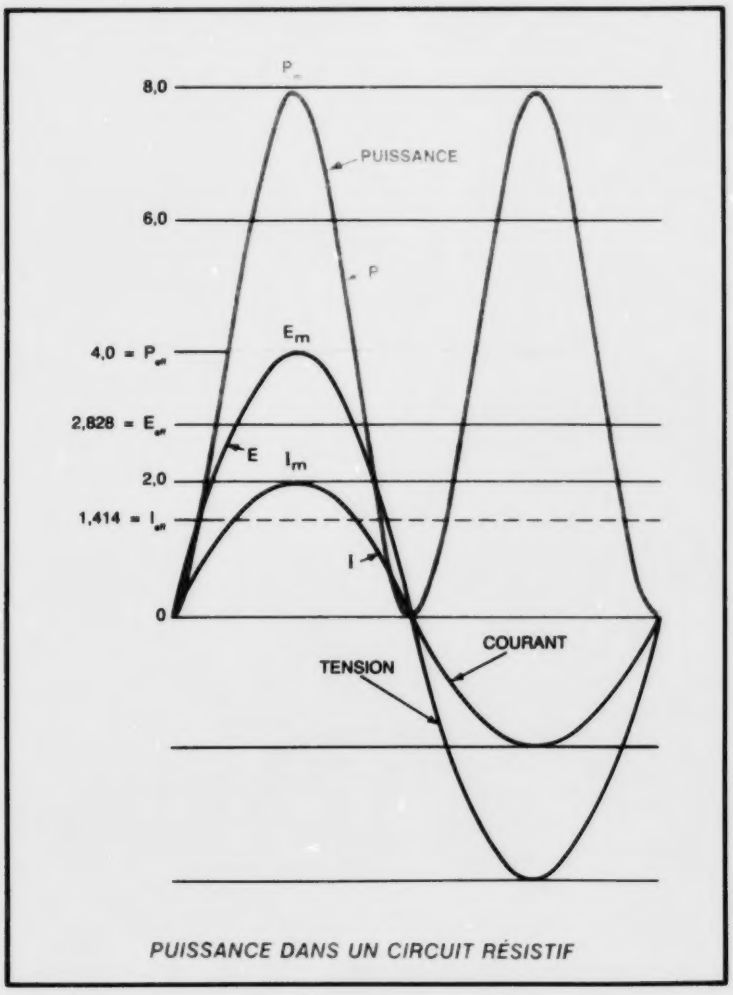


Fig. 11. L'onde de puissance dans un circuit résistif est en phase avec les ondes de tension et de courant. Toute la puissance est active parce que l'onde de puissance n'a que des valeurs positives.

L'onde de puissance montre graphiquement comment la puissance varie dans ce circuit. La valeur maximale de l'onde de puissance est de 8 W; la courbe de puissance est toute entière placée au-dessus de la ligne zéro, ce qui indique que la puissance est alternative mais toujours positive. On dit que la puissance dans ce circuit est *active*, car elle peut fournir un travail et produire de la chaleur. D'après la figure 11, on constate que, dans un circuit résistif, toute la puissance est active.

Pour calculer la puissance efficace d'un circuit à c.a., il suffit de multiplier les valeurs efficaces de la tension et du courant soit:

$$P_{eff} = E_{eff} \times I_{eff}$$

La formule est la même que celle utilisée pour calculer la puissance d'un circuit à c.c., mais les symboles P_{eff}, E_{eff} et I_{eff} représentent ici les valeurs efficaces de la puissance, de la tension et du courant. Dans l'exemple représenté sur la figure 11, la valeur efficace de la tension est $E_{eff} = 0{,}707 \times 4$, soit 2,828 V; la valeur efficace du courant est $I_{eff} = 0{,}707 \times 2$, soit 1,414 A et la valeur efficace de la puissance est $P_{eff} = E_{eff} \times I_{eff} = 2{,}8282 \times 1{,}414$, soit 4 W.

21 Puissance dans les circuits à c.a. purement réactifs

Dans la mesure où tout circuit contient une résistance même faible, un circuit purement réactif n'existe pas. Mais il est plus facile de supposer que de tels circuits existent pour aborder la notion de réactance. La **figure 12** indique les conditions d'un circuit ne comportant qu'une seule réactance. Les ondes sont similaires à celles que l'on trouverait dans un circuit inductif, à savoir que le courant a un retard de 90° sur la tension. Comme c'était le cas sur la figure 11,

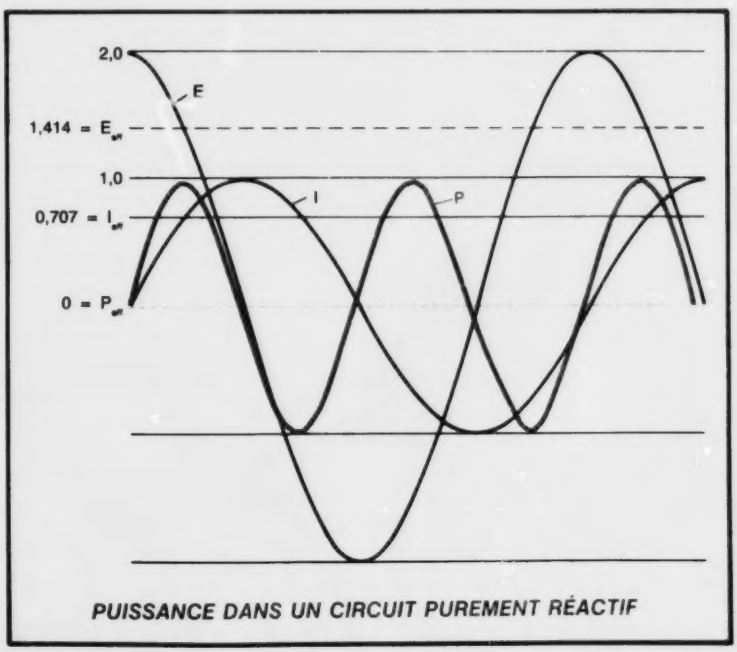


Fig. 12. Dans ce circuit purement réactif, l'onde de courant a un retard de 90° sur l'onde de tension (notez que l'onde de puissance est positive la moitié du temps et négative l'autre moitié).

chaque valeur instantanée de l'onde de puissance *P* représentée sur la figure 12 est égale au produit de la tension et du courant à cet instant. Il convient de noter qu'à chaque point où, soit la tension, soit le courant revient à zéro, la puissance elle aussi est égale à zéro.

Il faut aussi noter que l'onde de puissance *P* représentée sur la figure 12 devient parfois négative. Les parties négatives de l'onde de puissance *P* sont exactement égales aux parties positives correspondantes. La différence entre la puissance positive et la puissance négative représente la puissance fournie à la charge. Dans ce cas, la différence est de zéro.

Dans la pratique, un circuit purement réactif n'existe pas, car il y a toujours une *certaine* résistance. Mais pour faciliter la compréhension, on dit que la puissance active dans un circuit purement réactif est égale à zéro et que la puissance, comme le montre la figure 12, est entièrement réactive. Aucune puissance active n'est fournie à la charge dans un circuit purement réactif.

22 Puissance dans les circuits à c.a. partiellement réactifs

La **figure 13** montre le rapport entre les ondes de tension, de courant et de puissance, lorsque le déphasage entre le courant et la tension est autre que 0° ou 90°. Ici, le courant a une avance de 45° sur la tension. Ainsi, les ondes de la figure 13 représentent la condition qui prévaut dans un circuit capacitif où la réactance capacitive et la résistance sont égales.

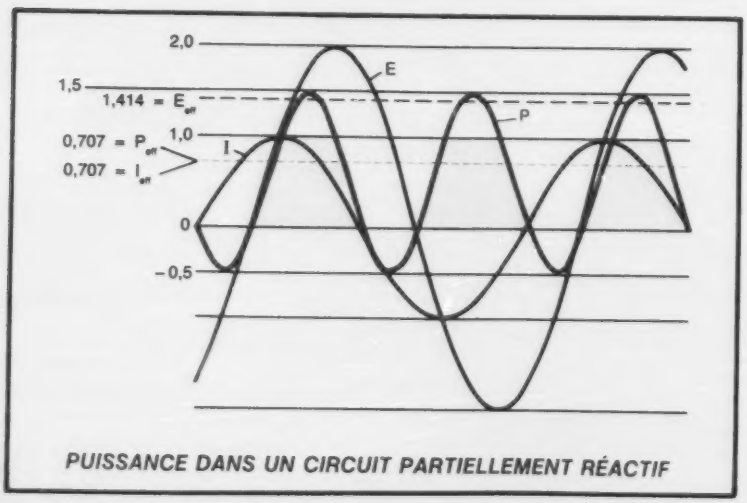


Fig. 13. Dans ce circuit capacitif, les ondes de tension et de courant sont déphasées. Une puissance est positive, l'autre est négative. La différence entre la puissance positive et la puissance négative représente la puissance active. Les zones de l'onde qui correspondent à la puissance active sont représentées en couleur.

De nouveau, chaque point sur l'onde de puissance *P* représente le produit de la tension et du courant à cet instant. Certaines parties de l'onde de puissance sont positives et d'autres sont négatives. Sur la figure, les extrémités de l'onde de puissance s'annulent. Le reste de l'onde de puissance placé au-dessus de la ligne zéro représente la puissance active, c'est-à-dire la puissance *fournie* à la charge. Les parties correspondent à la puissance active sont hâchurées en rouge. La valeur efficace de la tension sur la figure 13 est

$$E_{eff} = 0{,}707 \times 2 = 1{,}414 \text{ V}$$

La valeur efficace du courant est

$$I_{eff} = 0{,}707 \times 1 = 0{,}707 \text{ A}$$

La valeur apparente de la puissance est

$$P_{eff} = E_{eff} \times I_{eff} = 1{,}414 \times 0{,}707 = 1 \text{ W}$$

23 Puissance apparente dans un circuit à c.a.

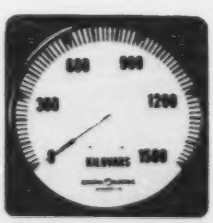
Lorsqu'on multiplie la tension appliquée par l'intensité du courant total dans un circuit à c.a., on n'obtient pas la puissance active utilisée dans le circuit, mais plutôt la *puissance apparente*.

La puissance apparente dans un circuit à c.a. n'est pas mesurée en watts, mais en voltampères. Ainsi, dans un circuit à c.a.

$$P_{app} = EI$$

où P_{app}[1] = puissance apparente, en volts-ampères
E_{eff} = tension appliquée, en volts
I_{eff} = intensité du courant total du circuit, en ampères

Dans un circuit à c.a., seule la partie réelle de la puissance apparente effectue un travail utile. C'est ce qu'on appelle la *puissance active*, qui est mesurée en watts. Le reste de la puissance apparente est appelée puissance *réactive* et elle ne contribue pas au travail électrique utile. Il faut néanmoins en tenir compte, lorsqu'on détermine le calibre des conducteurs et les types d'isolants. La partie réactive de la puissance apparente est mesurée en voltampères réactifs ou VAR.



Courtoisie de la General Electric Company, Division Instruments

La relation entre la puissance apparente (en voltampères, ou VA), la puissance active (en watts) et la puissance réactive (en voltampères réactifs ou VAR) est définie par l'équation suivante:

$$\text{Puissance apparente} = \sqrt{(\text{puissance active})^2 + (\text{puissance réactive})^2}$$

1. Souvent la puissance apparente est indiquée par VA.

Ce rapport exprimé en unités, c'est-à-dire en volts (V), ampères (A) et watts (W), s'écrit de la manière suivante:

$$VA = \sqrt{W^2 + VAR^2}$$

(Le symbole $\sqrt{}$ signifie «racine carrée» de la quantité exprimée à l'intérieur du symbole, quelle que soit cette quantité. Par exemple, $\sqrt{36}$ signifie racine carrée de 36, soit 6, puisque $6 \times 6 = 36$.) Dans les circuits installés dans une usine, on utilise généralement des unités de puissance supérieures comme les kilovolts et les kilowatts, à la place des volts et des ampères, ainsi:

1 kW = 1000 W
1 kVA (kilovolt-ampère) = 1000 VA
1 kVAR (kilovoltampère-réactif) = 1000 VAR

24 Puissance active dans les circuits à c.a.

La puissance active consommée dans un circuit à c.a. peut être calculée d'après la formule suivante:

$$P_{act} = E_{eff} \times I_{eff} \times \text{fp} \qquad (1)$$

où P_{act} = puissance active, en watts
E_{eff} = tension appliquée, en volts
I_{eff} = intensité du courant total, en ampères
fp = facteur de puissance

Le facteur de puissance est un nombre compris entre 0 et 1, soit 0,1, 0,25, 0,7 ou 0,85. Normalement, dans vos activités professionnelles, pour obtenir le facteur de puissance d'un circuit ou d'un système à c.a., il vous suffira de lire sa valeur sur un cosinusphimètre ou de la déterminer à partir d'un tableau ou d'un diagramme. Mais si vous voulez être un électricien d'entretien bien informé, vous devez savoir que le facteur de puissance est en réalité une fonction trigonométrique égale au cosinus de l'angle θ (cos θ). C'est l'angle correspondant au retard du courant sur la tension. Le cosinus d'un angle peut être facilement déterminé à l'aide d'un tableau. Pour un angle de phase de 0°, le facteur de puissance est de 1 (un), à savoir, cos 0° = 1, et pour un angle de phase de 90°, le facteur de puissance est de 0, à savoir cos 90° = 0. Il est inutile de poser des questions de trigonométrie. En effet, la valeur du facteur de puissance

peut également être calculée comme étant le quotient de la résistance R et à l'impédance Z, soit

$$\text{fp} = \frac{R}{Z} \qquad (2)$$

Le facteur de puissance peut également être exprimé par le rapport suivant:

$$\text{fp} = \frac{\text{puissance active}}{\text{puissance apparente}} \qquad (3)$$

Vous souvenez-vous que l'impédance est la combinaison de la résistance et de la réactance? Ainsi, si un circuit contient une quelconque réactance, l'impédance est toujours supérieure à la résistance, si bien que le facteur de puissance est toujours une décimale comprise entre 0 et 1. De même, d'après la formule 3, puisque la puissance apparente est toujours supérieure à la puissance active, leur rapport (ou facteur de puissance) est inférieur à 1 dans un circuit à c.a. réel. Le facteur de puissance ne serait égal à 1 et la puissance réactive à 0 que si l'impédance était égale à la résistance (comme dans le cas d'un circuit résistif).

25 Application de la formule de la puissance

Comme vous venez de l'apprendre, la puissance active peut être calculée d'après la formule

$$P_{act} = E_{eff} \times I \times \text{fp}$$

Dans cette formule, P_{act}, E_{eff} et I_{eff} sont des valeurs efficaces.

Pour utiliser cette formule, il vous suffit de savoir faire une multiplication. Voici quelques exemples qui s'appliquent aux conditions représentées par les figures 11, 12 et 13:

Sur la figure 11, E_{eff} = 2,828 V et I_{eff} = 1,414 A. L'angle de phase est de 0° et le facteur de puissance (fp) est égal à 1. Donc, la puissance active du circuit est:

$$P_{act} = E_{eff} \times I_{eff} \times \text{fp}$$
$$= 2{,}828 \times 1{,}414 \times 1 = 4 \text{ W}$$

Il s'agit de la valeur que nous avions obtenue précédemment (avant d'introduire le terme de «facteur de puissance») en utilisant graphiquement les valeurs efficaces de la tension et du courant.

Sur la figure 12, le déphasage entre la tension et le courant est de 90°. Donc, le facteur de puissance dans le circuit est fp = 0. La puissance active est:

$$P_{act} = E_{eff} \times I_{eff} \times \text{fp}$$
$$= 1{,}414 \times 0{,}707 \times 0 = 0 \text{ W}$$

Sur la figure 13, le déphasage est de 45° et le facteur de puissance 0,707. Donc, la puissance active est:

$$P_{act} = E_{eff} \times I_{eff} \times \text{fp}$$
$$= 1{,}414 \times 0{,}707 \times 0{,}707 = 0{,}707 \text{ W}$$

En résumé, retenez les points suivants:

Dans tout circuit à c.a., le facteur de puissance est égal au rapport entre la puissance active et la puissance apparente ou au rapport entre la résistance et l'impédance du circuit. Plus l'angle de phase est grand, plus le facteur de puissance est petit.

Le facteur de puissance est aussi très souvent exprimé sous forme d'un pourcentage. Par exemple, un facteur de puissance de 0,707 peut être exprimé par le pourcentage 70,7% (pour cent) et le facteur de puissance 1 équivaut au facteur de puissance 100%.

26 Facteurs de puissance dans l'industrie

Courtoisie de la General Electric Company, Division Instruments

Lorsque le courant et la tension sont en phase dans un circuit, tout le courant produit efficacement de la puissance, l'angle de phase est égal à zéro, le facteur de puissance est égal à 1 et toute la puissance apparente est active (néanmoins, un facteur de puissance de 1 est assez rare dans les circuits électriques de l'industrie). Si le courant était déphasé de 90° par rapport à la tension, le circuit ne contiendrait que des réactances, le facteur de puissance serait égal à zéro et toute la puissance apparente serait réactive. Dans la pratique, un facteur de puissance nul est impossible.

Une réactance inductive entraîne un facteur de puissance «en retard» dans le circuit et une réactance capacitive entraîne un facteur de puissance «en avance».

Dans les circuits industriels de distribution électrique, les facteurs de puissance sont généralement compris entre 0,75 et 1 (ou entre 75 % et 100 %), en retard de phase. Les valeurs peuvent par-

fois descendre jusqu'à 0,5 , mais des facteurs de puissance inférieurs à 0,5 sont rares. Des facteurs de puissance faibles ne sont pas souhaitables. Plus le facteur de puissance est faible, plus il faut de courant pour transporter une puissance déterminée. De longues lignes de transport et de distribution risquent de provoquer une avance du facteur de puissance annulant le retard du facteur de puissance provoqué par les réactances inductives des charges dans un circuit commercial.

La réactance supplémentaire dans un circuit ayant un faible facteur de puissance ne fait que provoquer une augmentation des pertes dans le circuit, de telle sorte qu'il faut augmenter le calibre des conducteurs pour transporter le courant utile. La puissance utile des alternateurs (et des lignes qu'ils desservent) peut souvent être accrue en raccordant sur les lignes certains dispositifs qui *corrigent* le facteur de puissance, c'est-à-dire le ramènent le plus près possible de l'unité ou 1. Si la ligne alimente de nombreux moteurs qui causent une réactance inductive, on peut corriger le facteur de puissance en raccordant des condensateurs. Si le facteur de puissance, dans un circuit donné, est en avance de phase, on peut le corriger à l'aide de réacteurs shunt.

Exercice de contrôle 3

Vous allez maintenant pouvoir réviser vos connaissances sur le courant alternatif monophasé en répondant au petit questionnaire suivant. Pour contrôler vos connaissances, il vous suffit de comparer vos réponses aux nôtres. Si vous vous êtes trompé en cours de route, n'oubliez pas de revoir la section citée en référence.

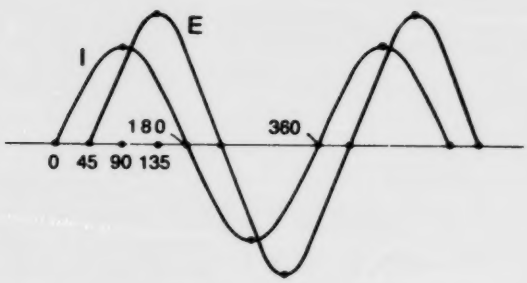
Vos réponses

1. Dans les circuits à c.a., l'onde de courant est généralement en avance ou en retard sur l'onde de tension. C'est pour cette raison que l'on considère le courant et la tension comme étant _____ .

1. _____

2. Dans le circuit représenté ci-dessous, l'onde du courant atteint sa valeur maximale à 90° et l'onde de tension atteint sa valeur maximale à 135°.

2. _____



Quel est l'angle de phase?

A. En avance de 45°
B. En retard de 45°
C. En avance de 90°
D. En retard de 90°

3. Les mots «ELI et ICE» vous aident à retenir que le courant (*I*) est en avance sur la tension (*E*) dans des circuits (inductifs, capacitifs) _____ .

3. _____

4. Vrai ou Faux? Dans un circuit purement résistif, toute la puissance est active.

4. Vrai Faux
(Encerclez votre choix)

5. Dans un circuit à c.a. partiellement réactif, une certaine quantité de la puissance est positive et une autre quantité de la puissance est négative. La différence entre la puissance positive et la puissance négative est la puissance _____ .

A. apparente
B. réactive
C. de phase
D. active

5. _____

6. Supposez que vous deviez travailler sur un circuit à réactance capacitive. Le déphasage est de 45°, le facteur de puissance de 0,707 et la tension efficace de 1,414 V et le courant efficace de 0,707 A. Quelle est la puissance active de ce circuit?

A. 0 W
B. 0,707 W
C. 1,414 W
D. 4 W

6. _____

Dans l'espace réservé en face de chaque groupe de mots de la colonne de droite, inscrivez la lettre correspondant à la phrase suivante qui l'explique le mieux.

7. *a.* S'oppose au flux de courant dans un circuit à c.a.
   b. Valeur de la puissance active dans un circuit purement réactif.
   c. Fait partie de la puissance apparente mais ne fournit pas de travail utile.
   d. Exemple de la manière dont on peut exprimer un angle de phase.
   e. Autre manière d'exprimer la puissance réelle.
   f. A toujours une valeur décimale comprise entre 0 et 1.

Vos réponses

7. En avance de 45°
Puissance active
Réactance
Zéro
Puissance réactive
Facteur de puissance

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 3

1. déphasés Section 17
2. A En avance de 45° Sections 17, 22
3. capacitifs Section 19
4. Vrai Section 20
5. D active Section 22
6. B 0,707 W Section 25
   Légende de la figure 13
   $(P_{ac} = E_e \times I_e \times fp =$
   $1,414 \times 0,707 \times 0,707 =$
   0,707 W)

7. *d* En avance de 45° Sections 17, 19
   e Puissance active Section 23
   a Réactance Section 16
   b Zéro Section 21
   c Puissance réactive Section 23
   f Facteur de puissance Section 24

Courant alternatif triphasé

27 Systèmes polyphasés

Les tensions et les courants alternatifs déphasés doivent être pris en considération dans les circuits à c.a. polyphasés. Du point de vue électrique, tout système ayant plus d'une phase est considéré comme un système polyphasé. Un système biphasé utilise simultanément deux circuits à c.a. raccordés à un alternateur biphasé. De même, un système triphasé utilise trois circuits à c.a. alimentés par un alternateur triphasé. Dans vos activités d'électricien d'entretien, vous serez très certainement amené à travailler sur des équipements alimentés par une puissance polyphasée.

Un alternateur biphasé comme celui représenté sur la figure 14(*a*), comporte deux groupes de bobines, *1* et *2*, chacune produisant une tension et un courant alternatifs. Dans la mesure où les deux groupes de bobines sont matériellement placés à un angle de 90°, les deux tensions produites ne sont pas en phase, mais bien déphasées de 90° l'une par rapport à l'autre. Cela signifie que l'angle de phase ϕ (phi en grec) entre les deux tensions est de 90°. Ce rapport de phase est également représenté sur la figure (*a*); les deux tensions ont la même fréquence et la même valeur maximale, mais leurs valeurs maximale et minimale, ainsi que les autres valeurs instantanées correspondantes, ne sont pas atteintes en même temps.

Un alternateur triphasé comporte trois groupes de bobines, 1, 2, et 3, placés à un angle de 120° comme l'indique la figure (*b*). Trois tensions alternatives distinctes sont engendrées par cet alternateur et le déphasage entre chaque tension est: $\phi = 120°$, comme l'indique la figure.

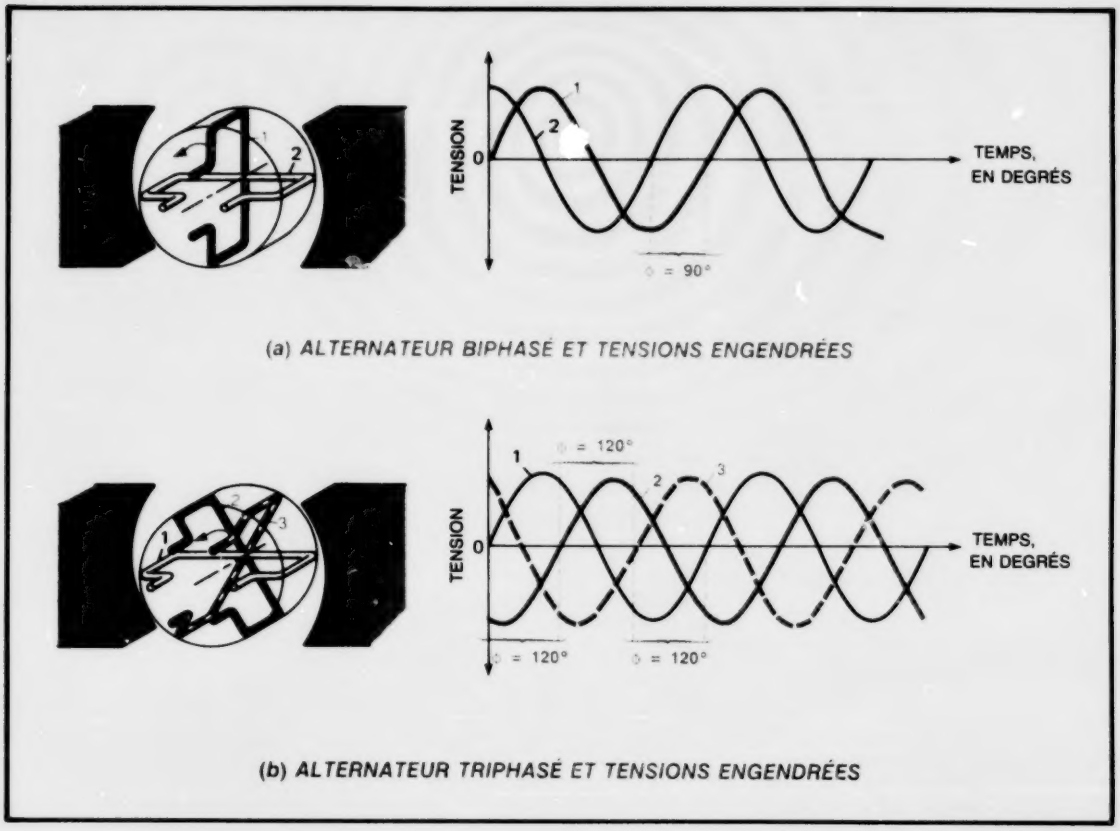


Fig. 14. Les bobines d'un alternateur biphasé sont placées à angle droit et par conséquent leurs ondes sont séparées par un angle de 90°. Les bobines de l'alternateur triphasé, également espacées autour de l'induit, produisent des ondes séparées par un angle de 120°.

On notera que le symbole ϕ (qui est la lettre grecque *phi*) est utilisé pour décrire l'angle entre les phases dans un système polyphasé (pour décrire l'angle de phase entre le courant et la tension, on utilise le symbole θ (la lettre grecque *thêta*)).

28 Circuits triphasés

Le système polyphasé le plus couramment utilisé est le système triphasé. Un système (ou circuit) triphasé reçoit trois tensions simultanées engendrées par un alternateur triphasé. Les tensions sont engendrées dans des enroulements de phase qui peuvent être intérieurement montés en Y (étoile) et en Δ (la lettre grecque delta, c'est-à-dire en triangle). Les trois tensions engendrées dans le système sont déphasées de 120°. Puisque les trois tensions atteignent leur valeur maximale à des moments différents, les courbes des tensions se chevauchent; on obtient ainsi une puissance de sortie plus régulière que dans les circuits monophasés.

Le courant est transporté vers la charge par des fils secteurs. Les systèmes triphasés sont classés, en fonction du nombre de fils secteurs, en systèmes trois fils ou quatre fils.

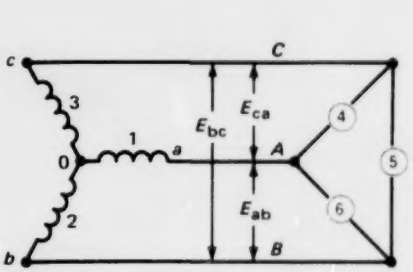
La charge d'un système est représentée par l'intensité du courant des charges raccordées au système. Ces charges (des moteurs par exemple) sont généralement conçues pour une alimentation en courant triphasé. Cependant, on trouve également des charges monophasées individuelles raccordées aux lignes de manière à bien répartir ou équilibrer la charge sur les lignes. Lorsqu'on parle de systèmes triphasés, on suppose généralement que le *système* est *équilibré*, avec des tensions, des courants et des facteurs de puissance égaux sur les lignes. Les déséquilibres de charge sont peu économiques et doivent par conséquent être évités.

29 Systèmes triphasés raccordés en étoile ou en triangle

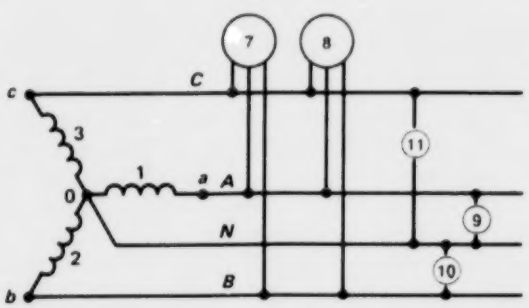
On parle de «montage en étoile» pour les systèmes triphasés à cause de la forme en étoile du montage des enroulements de phase, comme le montre la **figure 15,** (*a*) et (*b*). Ce montage ressemble également à la lettre Y, ce qui explique le nom de «montage en Y» plus couramment utilisé. Les trois enroulements de phase *1*, *2* et *3* de l'alternateur représentés en (*a*) sont raccordés au même point *o*. Leurs bornes *a*, *b*, et *c* sont raccordées aux fils secteurs *A*, *B* et *C*. Les charges *4*, *5* et *6* sont symétriquement raccordées (c'est-à-dire régulièrement réparties) entre les lignes.

La tension aux bornes d'un enroulement de phase est appelée tension de phase. La tension entre deux fils dans un circuit comme par exemple *A* et *B* ou *B* et *C*, ou encore *A* et *C*, est appelée tension de secteur ou de ligne. Les tensions de secteurs pour ces paires de fils sont représentées par E_{ab}, E_{bc} et E_{ca} en (*a*).

Fig. 15. Cette figure représente deux systèmes triphasés montés en Y. Si la tension de secteur des deux systèmes est de 208 V, les charges *4*, *5* et *6* sont des charges monophasées de 208 V, les charges *7* et *8* sont des charges triphasées de 208 V, et les charges *9*, *10* et *11* sont des charges monophasées de 120 V.



(a) SYSTÈME TROIS FILS MONTÉ EN Y



(b) SYSTÈME QUATRE FILS MONTÉ EN Y

Les règles permettant d'obtenir un système équilibré monté en Y sont les suivantes:

Règle 1. La tension de secteur est égale à 1,732 multiplié par la tension de phase d'un seul enroulement.

Règle 2. Le courant de secteur est égal au courant de phase parce que chaque fil secteur est en série avec un enroulement de phase.

Le système représenté sur la figure 15(*a*) est un système trois fils. Dans un système quatre fils monté en Y tel que celui représenté en (*b*), un quatrième fil *N* est raccordé au point commun *o*. Les charges triphasées, comme les moteurs triphasés *7* et *8*, peuvent être raccordés aux trois fils secteurs *A*, *B* et *C* de la même manière que pour les systèmes trois fils. De plus, on peut raccorder des charges monophasées, comme les lampes *9*, *10* et *11*, entre un fil secteur et le fil neutre. Les tensions entre *A* et *N*, *B* et *N* et *C* et *N* sont égales aux tensions de phase du système.

Si, par exemple, la tension de secteur du système illustré en (*b*) est égale à 208 V, des moteurs triphasés d'une tension nominale de 208 V peuvent être raccordés aux fils secteurs. La tension de phase est $\frac{208}{1,732}$ = 120 V. Par conséquent, des charges monophasées comme les lampes fabriquées pour fonctionner sous 120 V peuvent être raccordées entre le fil neutre et le fil secteur.

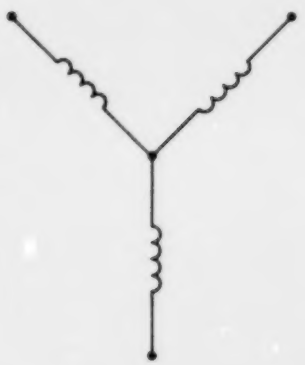
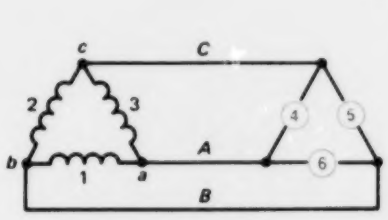


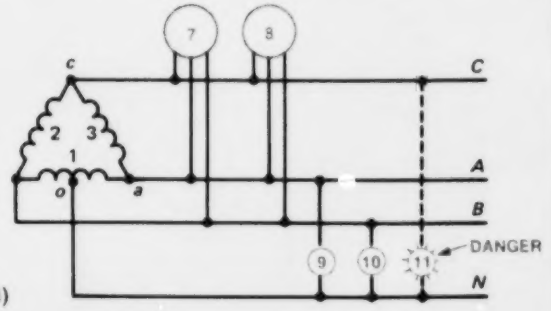
Fig. 16. Si la tension de secteur de deux systèmes triphasés Δ branchés en triangle est de 240 V, les charges *4*, *5* et *6* sont des charges monophasées 240 V; les charges *7* et *8 sont des charges triphasées 240 V; et les charges 9* et *10* sont des charges monophasées 120 V. On ne doit pas utiliser la charge *11*, la tension pouvant atteindre 208 V, valeur supérieure à 120 V qui est la tension de sécurité maximale.

30 Systèmes triphasés montés en triangle

Les enroulements triphasés d'un système monté en triangle sont raccordés en boucle fermée ressemblant à la lettre grecque *delta* Δ , d'où le nom de montage en triangle. Sur la **figure 16** *(a)* et*(b)*, les



(a) *SYSTÈME 3 FILS MONTÉ EN TRIANGLE (DELTA)*



(b) SYSTÈME 4 FILS MONTÉ EN TRIANGLE (DELTA)

enroulements de phase *1*, *2* et *3* n'ont pas de point commun. Leurs bornes a, b et c sont raccordées aux lignes A, B, et C.

Les règles s'appliquant aux systèmes montés en triangle Δ sont les suivantes:

Règle 1. La tension de secteur est égale à la tension de phase.

Règle 2. Le courant de secteur est égal à 1,732 multiplié par le courant de phase.

Dans le système trois fils représenté en (*a*), les charges ou phases de charge *4*, *5* et *6* sont raccordées symétriquement (et en Δ) aux lignes *A*, *B* et *C*. La tension aux bornes de chacune des phases *4*, *5* et *6* est la même que la tension de secteur. Si le courant dans chaque phase de charge est de 50 A, le courant de secteur dans chacune des lignes *A*, *B* et *C* est de 1,732 × 50 = 86,6 A.

Si l'on veut obtenir une tension plus basse à partir du système monté en Δ , on raccorde un quatrième fil *N* au point central *o* de l'enroulement *1* comme indiqué en (*b*). Dans un système quatre fils monté en triangle Δ comme celui-ci, la tension entre *N* et *A* et entre *N* et *B* est égale à la moitié de la tension du système. Par conséquent, des charges monophasées comme les charges *9* et *10* peuvent être raccordées au système. Si la tension de secteur est de 240 V, les charges *9* et *10* peuvent être prévues pour un fonctionnement sous 120 V. Il faut veiller à ne pas raccorder une charge monophasée comme la charge *11*, entre les lignes *N* et *C* parce que la tension entre *N* et *C* est plus élevée et risque donc d'endommager la charge en question.

31 Puissance dans les systèmes triphasés

Dans un système triphasé équilibré monté en Y ou en Δ , la puissance active totale est donnée par l'équation suivante:

$$P = 1{,}732 \times E \times I \times \text{fp}$$

où E = tension de secteur, I = courant de secteur et fp = facteur de puissance du système. Le problème d'application suivant montre comment utiliser la formule.

Problème d'application

Problème. Dans un système triphasé équilibré monté en Y, chaque tension de phase égale 7970 V et chaque ligne transporte un courant de 500 A. Quelle est la puissance active totale fournie par le système s'il fonctionne avec un facteur de puissance de 0,8?

Solution. Il faut d'abord convertir la tension de phase en tension de secteur: E = 1,732 × 7970 = 13 800 V. Le courant de secteur est: I = 500 A. La puissance active est:

$$P = 1{,}732 \times E \times I \times \text{fp}$$
$$= 1{,}732 \times 13\,800 \times 500 \times 0{,}8$$
$$= 9\,560\,000 \text{ W} = 9560 \text{ kW}$$

Exercice de contrôle 4

Vous allez maintenant faire une pause pendant quelques minutes et revoir quelques points-clés avant de répondre au questionnaire personnel. Comparez vos réponses aux nôtres et révisez, au besoin, les notions qui ne vous sont pas claires.

Vos réponses

1. Des alternateurs suivants, quel est celui qui engendrerait les deux tensions représentées sur le schéma suivant? 1. _____

A. Alternateur monophasé
B. Alternateur biphasé
C. Alternateur triphasé
D. Alternateur hexaphasé

2. Si vous observez un alternateur triphasé, vous devez normalement trouver _____ groupes de bobines placés à une distance angulaire de _____ °. 2. _____

3. Pour qu'un système triphasé fonctionne de manière économique, la charge sur les trois lignes doit être _____ . 3. _____

4. Des systèmes suivants, quel est celui qui correspond à un système quatre fils monté en Y ou en étoile? 4. _____

A.

C.

B.

D.

5. Dans un système équilibré monté en Y, si la tension de phase d'un seul enroulement est de 240 V, quelle est la tension de secteur? 5. _____

A. 120 V
B. 208 V
C. 240 V
D. 416 V

6. Vrai ou faux? Dans un système triphasé quatre fils monté en Y, on peut raccorder des charges monophasées entre le fil neutre et un fil secteur. 6. Vrai Faux

(Encerclez votre choix)

Voir les réponses à la page suivante.

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 4

1. B Alternateur biphasé — Section 27, figure 14
2. trois — 120° — Sections 27, 28, figure 14
3. équilibrée (ou régulièrement répartie) — Section 28
4. C — Section 29, figure 15(b)
5. D 416 V — (240 × 1,732 = 416 V) — Section 29
6. Vrai — Section 29

Examen personnel

Lisez attentivement chacune des phrases ci-dessous et assurez-vous que vous en comprenez bien le sens. Chaque phrase est suivie de quatre groupes de mots, dont un seul est correct. Faites un X sur la lettre qui correspond à votre réponse.

1. Lorsqu'une puissance électrique est transportée sur de longues distances, les pertes de ligne peuvent être réduites si l'on applique une tension alternative plutôt qu'une tension continue et si l'on transporte:

   A. une haute tension et un faible courant;
   B. une basse tension et un courant élevé;
   C. une haute tension et un courant élevé.
   D. une basse tension et un faible courant.

2. Lorsque vous appliquez la règle de la main le majeur indique la direction:
   A. du mouvement de la bobine.
   B. du champ magnétique inducteur.
   C. du flux du courant électronique.
   D. du flux de courant conventionnel.

3. Par combien de degrés-temps est passée une onde de tension alternative qui commence à zéro et effectue une *alternance*?

   A. 90°
   B. 180°
   C. 270°
   D. 360°

4. Votre contremaître utilise un oscilloscope pour mesurer la valeur *maximale* d'une onde alternative. Il vous dit que la tension a une valeur maximale de 100 V et vous demande de lui indiquer la valeur *efficace*: vous lui répondez:

   A. 10 V
   B. 70,7 V
   C. 100 V
   D. 707 V

5. Un alternateur fournit un courant de 20 A à un radiateur électrique de 5 Ω (charge). Quelle est la puissance calorifique de la charge?

   A. 5 W
   B. 20 W
   C. 500 W
   D. 2000 W

6. La gamme la plus élevée du voltmètre que vous utilisez est comprise entre 0 et 1000 V. Parmi les valeurs suivantes, quelle est celle qui s'applique à cette gamme?

   A. Valeur moyenne
   B. Valeur maximale
   C. Valeur de crête
   D. Valeur efficace

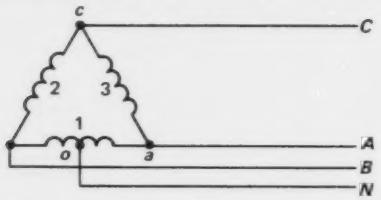
7. Si votre contremaître vous dit que tel circuit à c.a. est un circuit capacitif, vous savez que dans ce circuit:

   A. le courant est en avance sur la tension.
   B. le courant est en retard sur la tension.
   C. le courant et la tension sont en phase.
   D. le courant et la tension sont nuls.

8. Dans une usine industrielle moderne, la source d'alimentation électrique la plus vraisemblablement utilisée est:

   A. un système monophasé.
   B. un système biphasé.
   C. un système triphasé.
   D. un système tétraphasé.

9. Le système triphasé quatre fils 220 V, monté en triangle, représenté ci-dessous comporte une prise médiane dans l'enroulement *1*. On peut raccorder en toute sécurité une charge monophasée de 120 V entre:



   A. *A* et *B*.
   B. *A* et *N*.
   C. *B* et *C*.
   D. *C* et *N*.

10. Dans un système triphasé équilibré, chaque courant de secteur mesure 5 A et chaque tension de secteur mesure 220 V. Quelle est la puissance active approximative, sachant que le facteur de puissance est de 0,7?

   A. 154 W
   B. 1100 W
   C. 1335 W
   D. 1770 W

Les réponses sont données à la page 331.

Courant alternatif

AF0201

(Lexiques)

Français	Anglais
Aimant en fer à cheval	Horse-shoe magnet
Alternance	Alternation
Alternateur	Alternator
Amplitude	Distance
Appareil	Device
Bague collectrice	Slip-ring
Balai	Brush
Bobine inductrice	Conductor coil
Boucle	One turn coil
Capacité	Capacitance
Circuit réactif	Reactive circuit
Circuit résistif	Resistive circuit
Condensateur	Capacitor
Cosinusphimètre	Power factor meter
Courant de secteur	Line current
Courant déphasé en avance	Leading current
Courant déphasé en retard	Lagging current
Crête	Peak
Crête-à-crête	Peak-to-peak
Dépannage	Trouble-shooting
Déphasage	Difference in phase
Déphasé	Out of phase
Dispositif	Device
Distribution	Distribution
Durée	Time period
En phase	In phase
Entretien	Maintenance
Fil secteur	Line wire
Flux de courant conventionnel	Conventional current flow
Hexaphasé	Six phase
Inductance	Inductance
Intensité de courant	Amount of current
Lampe à incandescence	Incandescent light
Montage en étoile	Wye connection
Montage en triangle	Delta connection
Phase de charge	Load phase
Pôle inducteur	Field pole
Polyphasé	Polyphase
Produire	Generate (to)
Puissance active	True (real) power
Puissance réelle	Real power
Puissance thermique	Heating power
Puissance utilisée	Power expended
Raccordé	Connected
Rapport de phase	Phase Relation
Réactance capacitive	Capacitive reactance
Réactance inductive	Inductive reactance

Anglais	Français
Alternation	Alternance
Alternator	Alternateur
Amount of current	Intensité de courant
A.C. voltage	Tension alternative
Brush	Balai
Capacitance	Capacité
Capacitive reactance	Réactance capacitive
Capacitor	Condensateur
Check (A)	Vérification
Conductor coil	Bobine inductrice
Connected	Raccordé (au point...) + monté en Y, étoile, etc.
Conventionnal current flow	Flux de courant conventionnel
Delta connexion	Montage en triangle
Device	Appareil/Dispositif
Difference in phase	Déphasage
Distance	Amplitude
Distribution	Distribution
Effective value	Valeur efficace
Field pole	Pôle inducteur
Four phase	Tétraphasé
Generate (to)	Générer (alternateur, générateur)
Generate (to)	Produire
Horse-shoe magnet	Aimant en fer à cheval
In phase	En phase
Incandescent lamp	Lampe à incandescence
Inductance	Inductance
Inducted voltage	Tension induite
Inductive reactance	Réactance inductive
Leading current	Courant déphasé (en avance sur la tension)
Lagging current	Courant déphasé (en retard sur la tension)
Line current	Courant de secteur
Line voltage	Tension de secteur
Line wire fil	Fil secteur
Load phase	Phase de charge
Maintenance	Entretien
One turn coil	Boucle
Out of phase	Déphasé
Peak	Crête
Peak-to-peak	Crête-à-crête
Phase relation	Rapport de phase
Polyphase	Poiyphasé
Power expended	Puissance utilisée
Power factor meter	Cosinusphimètre

Français	Anglais
Réacteur shunt	Shunt reactor
Relation de phase	Phase relation
Tension alternative	A.C. voltage
Tension de secteur	Line voltage
Tension induite	Inducted voltage
Tétraphasé	Four phase
Valeur efficace	Effective value
Vérification	Check (A)

Anglais	Français
Reactance	Réactance
Reactive circuit	Circuit réactif
Real power	Puissance réelle
Relation, phase	Rapport de phase
Resistive circuit	Circuit résistif
Self test	Questionnaire personnel
Shunt reactor	Réacteur shunt
Six phase	Hexaphase
Slip-ring	Bague collectrice
Time period	Durée/Période
Transmission	Transport
Trouble-shooting	Dépannage
True (real) power	Puissance active
Wye connexion	Montage en étoile/Système monté en étoile

Alternateurs

AF0202

Alternateurs

Objectifs d'enseignement

Les installations industrielles utilisent de nombreuses machines qui fonctionnent en courant alternatif fourni par des alternateurs.

Ce cours a pour objectif de vous expliquer comment fonctionne un alternateur simple et comment les mêmes principes de fonctionnement s'appliquent à des machines de plus grande taille. Vous apprendrez également comment est construit un alternateur et comment il fonctionne.

À la fin du cours, vous devriez être en mesure:

- *D'expliquer le fonctionnement des alternateurs monophasés et triphasés.*
- *D'énumérer et de décrire les principaux composants d'un alternateur.*
- *De discuter des régimes d'un alternateur en terme de puissance, de tension, de vitesse et de température.*
- *D'énumérer les phases nécessaires au démarrage, à l'arrêt et au fonctionnement des alternateurs.*
- *De décrire les ressemblances et les différences de trois principaux types d'alternateurs.*

Table des matières

Principes fondamentaux de l'alternateur de base

Alternateur de base	65
Production de la tension	66
Valeur de la tension produite	67
Fréquence de la tension produite	67
Alternateurs polyphasés	68
Rotor et stator	69
Circuit magnétique	71
Électro-aimants utilisés comme pôles inducteurs	71
Exercice de contrôle 1	72

Composants de l'alternateur

Inducteur et induit	74
Moteur primaire	76
Excitatrice	76
Excitatrice statique	77
Construction du stator	77
Couplage des enroulements du stator	78
Construction du rotor	78
Balais	80
Exercice de contrôle 2	81

Caractéristiques nominales des alternateurs

Valeur nominale standard	83
Régulation de la tension	84
Choix de la valeur nominale d'un alternateur	84
Régulation de la vitesse	85
Vitesses nominales	86
Élévation de température	86
Surcharges	87
Ventilation des alternateurs	87
Exercice de contrôle 3	89

Fonctionnement des alternateurs

Fonctionnement sur grand système électrique 91
Démarrage d'un alternateur indépendant 92
Arrêt d'un alternateur indépendant 92
Fonctionnement en série 93
Montage parallèle d'alternateurs monophasés 93
Fonctionnement correct d'alternateurs montés en parallèle 94
Arrêt des alternateurs fonctionnant en parallèle 95
Exercice de contrôle 4 96

Types d'alternateurs

Alternateurs à moteur 97
Alternateurs à turbine hydraulique 98
Caractéristiques des alternateurs à turbine à vapeur 99
Ventilation des turbogénératrices 100
Exercice de contrôle 5 101

Examen personnel 102

Lexiques 104

Principes fondamentaux de l'alternateur de base

1 Alternateur de base

L'alternateur ou génératrice de c.a. (courant alternatif) est une machine qui produit une tension alternative. Vous vous souviendrez que le courant alternatif circule d'abord dans une direction, puis dans une autre (*alternée*). Sous sa forme la plus simple, la génératrice de c.a. se compose d'une seule boucle de fil qui tourne dans un champ magnétique (**fig. 1**(a)). La boucle est montée sur un arbre qui est entraîné par une source mécanique externe appelée *moteur primaire*. Un moteur primaire peut être une machine à vapeur, une turbine hydraulique, ou encore un moteur diesel ou à gaz.

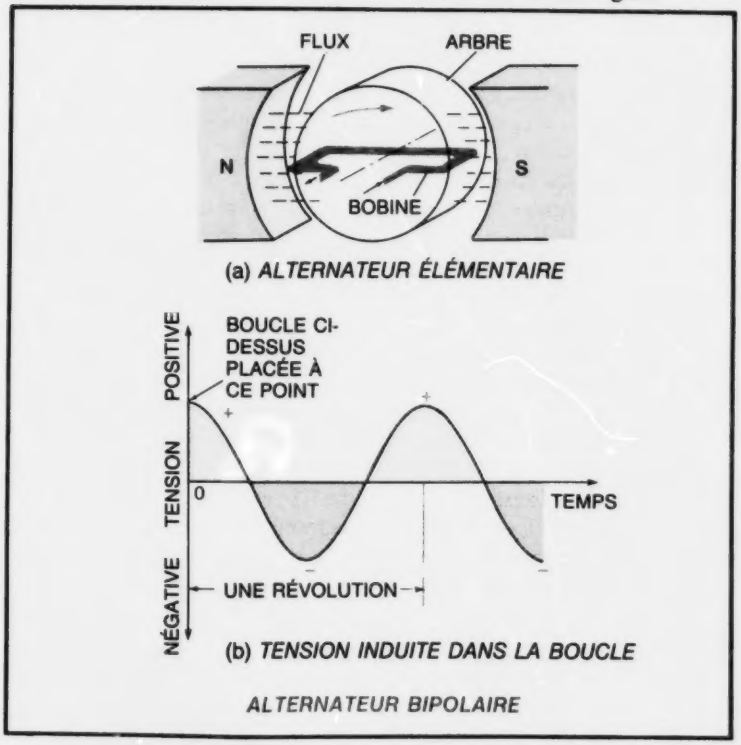


Fig. 1. Au fur et à mesure que la boucle de l'alternateur représentée en (*a*) tourne, la tension induite dans la boucle change. Ce changement de tension est représenté par la ligne ondulée illustrée en (*b*). Cette ligne ondulée est appelée courbe *sinusoïdale*.

Au cours d'une révolution de la boucle, la tension induite passe d'une valeur maximale positive à une valeur de zéro (0) volt, puis d'une valeur maximale négative à une valeur de zéro (0) volt, pour revenir à une valeur maximale positive

Au fur et à mesure que la boucle tourne dans le sens des aiguilles d'une montre à partir de la position indiquée en (*a*), le côté droit du conducteur se déplace vers le bas en traversant le champ magnétique, ou flux, du pôle nord *N*. L'autre côté de la boucle, c'est-à-dire le côté gauche, se déplace vers le haut en traversant le flux du pôle sud *S*. Une tension est induite dans le conducteur lorsqu'il coupe le flux.

Au bout d'une demi-révolution, le premier côté de la boucle du conducteur se déplace vers le haut en traversant le flux du pôle sud. Dans le même temps, le deuxième côté se déplace vers le bas en traversant le flux du pôle nord. L'action du conducteur qui coupe le flux est la même que dans l'exemple précédent mais, cette fois, *la direction de la tension induite est inversée*. La tension induite continue de s'inverser à chaque révolution, comme on le voit en (*b*). C'est ainsi qu'une tension alternative est appliquée à un circuit externe pour amorcer des points d'utilisation alimentés en courant alternatif tels que lampes et moteurs.

2 Production de la tension

Lorsque la boucle représentée sur la figure 1(*a*) se trouve à la position indiquée, c'est à cet endroit qu'elle coupe le flux le plus important. C'est à ce point que la tension maximale est induite, comme l'indique la première crête de tension sur la courbe représentée en (*b*). La rotation ultérieure de la boucle fera que le flux sera coupé de manière angulaire, ce qui diminuera la force de coupe et donc, la tension induite. Lorsque la boucle se trouve à mi-chemin (dans le sens vertical) entre les deux pôles, les côtés de la boucle se déplacent alors parallèlement au flux. À ce stade, aucune ligne de flux n'est coupée. En conséquence, *aucune force de coupe ne s'exerce* et *aucune tension n'est induite*.

Au stade suivant, les côtés de la boucle commencent à couper les flux des pôles opposés. Pendant cette phase de la rotation, les tensions induites produisent la moitié négative de la courbe ou onde sinusoïdale. La tension induite atteint à deux reprises sa valeur maximale pendant chaque cycle: une valeur maximale positive et une valeur maximale négative.

Le graphe représenté sur la figure 1(*b*) est caractéristique d'une tension alternative. La succession d'une moitié positive et d'une moitié négative d'onde sinusoïdale correspond à ce que l'on appelle un *cycle*. Cette succession de la moitié «positive» et de la moitié «négative» se répète chaque fois que la boucle tourne dans le champ magnétique. **Le nombre de successions qui se répètent pendant chaque seconde correspond à ce que l'on appelle la fréquence de la tension. La fréquence est exprimée soit en cycles par seconde, soit en hertz.**

3 Valeur de la tension produite

La tension présente aux bornes d'un alternateur dépend de trois facteurs. Le premier facteur est le *nombre de spires* de la boucle. Par exemple, si l'on induit 1 V (volt) dans une seule spire de fil, on peut doubler la tension en ajoutant simplement une autre spire. Et si l'on prévoit 20 spires, la tension induite sera 20 fois supérieure à celle induite avec une seule spire.

Le deuxième facteur est la *vitesse de coupe*. Souvenez-vous que lorsqu'un conducteur coupe un champ magnétique, une certaine tension est induite dans le conducteur. Lorsque la vitesse du conducteur est doublée, ce dernier coupe les lignes de force deux fois plus vite; la tension induite est alors elle aussi doublée. En pratique, on utilise la fréquence plutôt que la vitesse pour les calculs, puisque la vitesse à laquelle les lignes sont coupées dépend toujours de la fréquence.

Le troisième facteur est l'intensité du champ magnétique. Plus les pôles magnétiques sont intenses, plus ils produisent de lignes de force; plus les lignes de force sont nombreuses, plus la valeur de la tension induite est élevée.

4 Fréquence de la tension produite

Dans les alternateurs bipolaires, tels que ceux représentés sur la figure 1(*a*) et la **figure 2**(*a*), une révolution physique complète de la boucle du conducteur représente un angle de 360 degrés. Au cours de cette *unique révolution*, l'alternateur bipolaire produit *un cycle complet* de tension. Un cycle équivaut à un angle de 360 degrés. Cependant, comme nous l'avons vu dans un cours précédent, les degrés d'un angle de déphasage sont différents des degrés angulaires qui servent à mesurer physiquement des angles.

Si une génératrice de c.a. est équipée de deux paires de pôles, comme l'alternateur quadripolaire que représente la figure 2(b), il suffit que la boucle accomplisse une demi-révolution (180 degrés angulaires, soit d'un pôle nord à l'autre) pour produire un cycle complet dont l'angle est de 360 degrés. Au cours d'une révolution complète de la boucle, deux cycles complets de tension sont produits. Les deux cycles représentent un angle de 720 degrés.

Un alternateur hexapolaire équipé de trois paires de pôles, comme celui que représente la figure 2(*c*), produit trois cycles complets (1080 degrés) au cours d'une révolution physique complète de la boucle.

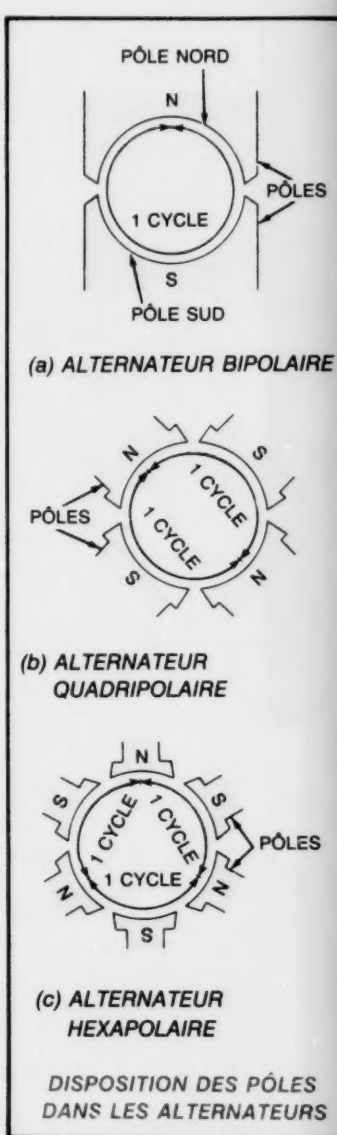


Fig. 2. Le nombre de cycles produit au cours d'une révolutio de la boucle d'un alternateur dépend du nombre de paires de pôles. (Notez qu'un pôle sur deu est de polarité opposée.)

Pour tout alternateur équipé d'un nombre donné de paires de pôles, la même règle générale s'applique, à savoir:

Règle. Le nombre de cycles produit dans un alternateur au cours d'une révolution est égal au nombre de paires de pôles de l'alternateur.

Par exemple, un alternateur à 18 pôles produit $18 \div 2 = 9$ cycles de tension alternative au cours d'une révolution.

La fréquence, c'est-à-dire le nombre de cycles de tension produit pendant une seconde, *dépend du nombre de pôles de l'alternateur* et *de la vitesse du conducteur*. Un alternateur équipé de plus de deux pôles accomplit autant de cycles par révolution qu'il y a de paires de pôles. Ainsi, la fréquence (en hertz) est égale au nombre de paires de pôles, multiplié par le nombre de révolutions par seconde, soit:

$$f = \frac{v}{60} \times \frac{P}{2} = \frac{v \times P}{120}$$

où f = fréquence, en hertz
v = vitesse, en révolutions par minute
P = nombre de pôles

Par exemple, un alternateur tournant à 240 tours/minute, équipé de 30 pôles, produira une tension dont la fréquence sera:

$$f = \frac{v \times P}{120} = \frac{240 \times 30}{120} = 60 \text{ Hz (hertz)}$$

5 Alternateurs polyphasés

Si l'alternateur est muni de trois boucles mobiles au lieu d'une, comme sur la **figure 3**(*a*), les tensions induites dans toutes les boucles seront égales; cependant, elles seront décalées (déplacées) dans le temps l'une par rapport à l'autre. Ce déplacement dans le temps se produit parce que les trois boucles sont physiquement séparées par un angle de 120° (degrés). Le graphe de la figure 3(*b*) représente les tensions induites dans les trois boucles, dans leurs phases temporelles respectives.

Un *alternateur triphasé* produit trois tensions qui ont toutes la même amplitude et la même fréquence, mais qui sont *déphasées* l'une par rapport à l'autre.

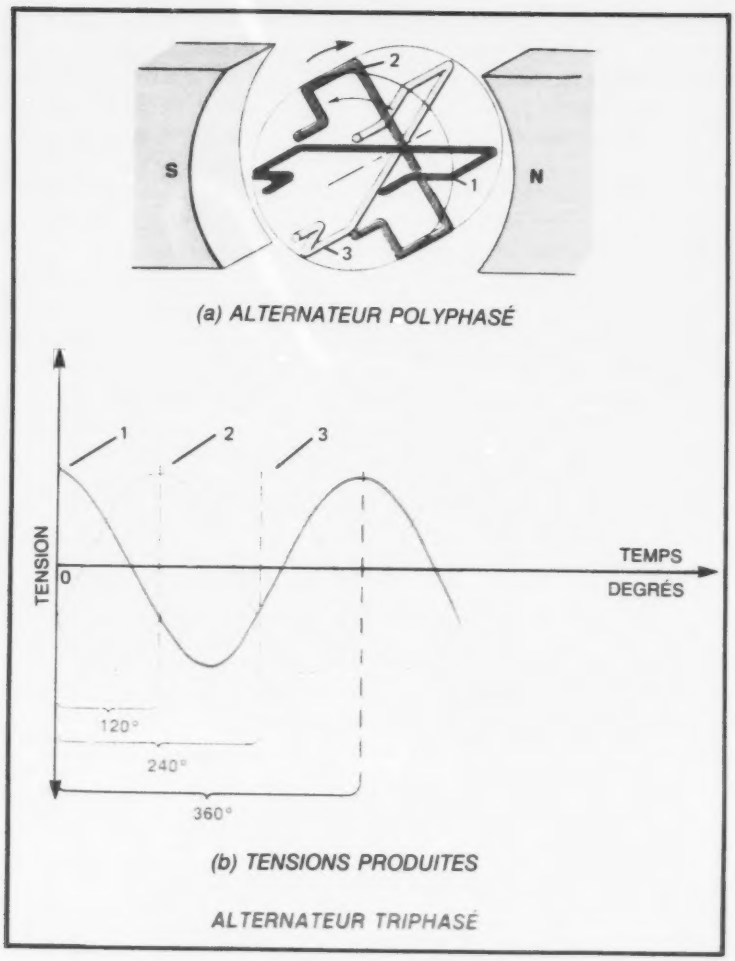


Fig. 3. L'alternateur polyphasé représenté ici est un alternateur triphasé. Les tensions produites 1, 2, et 3 correspondent aux positions des boucles 1, 2 et 3 respectivement. Chaque onde de tension est séparée par un angle de 120° des autres ondes de tension.

Les appareils électriques, comme les postes de radio et de télévision, sont conçus pour des tensions monophasées. En revanche, les machines industrielles rotatives de grande taille sont généralement conçues pour des tensions triphasées fournies par des systèmes triphasés. (Des tensions monophasées peuvent également être fournies par une phase «branche» d'un système triphasé.)

6 Rotor et stator

Dans les alternateurs simples des figures 1(*a*) et 3(*a*), les boucles tournent, alors que les pôles magnétiques restent fixes. Un alternateur peut également fonctionner lorsque les boucles restent fixes et que les pôles magnétiques tournent. En fait, il s'agit même de la con-

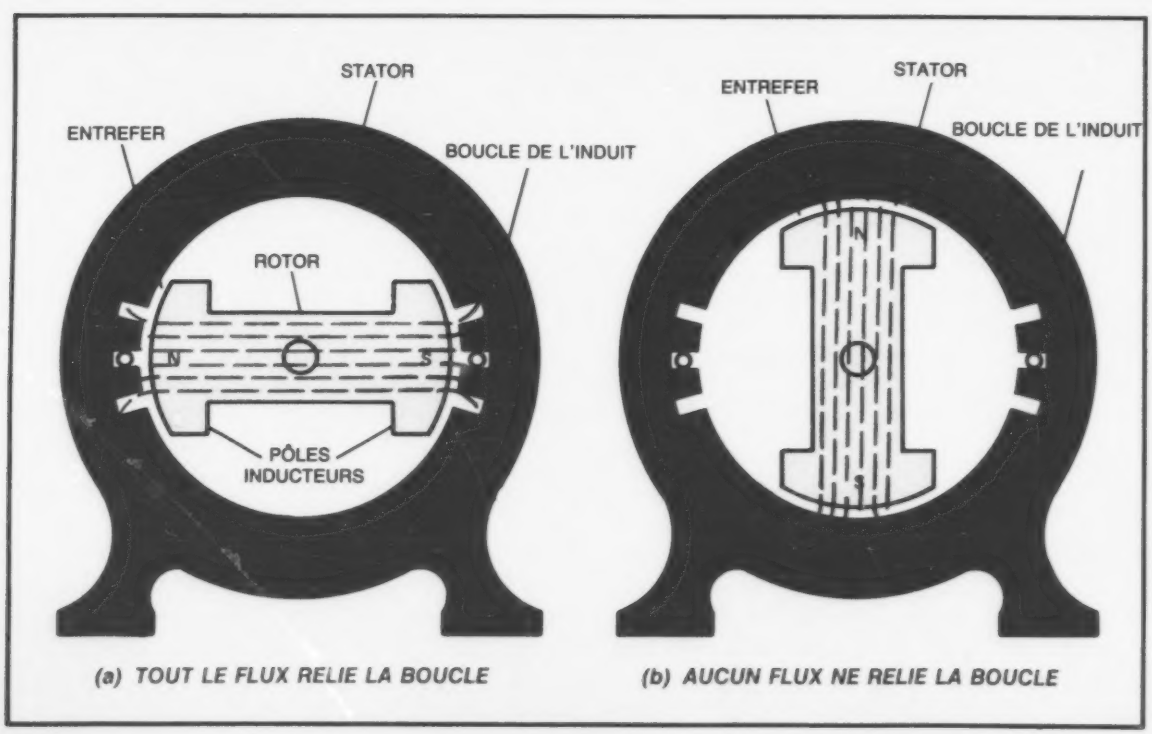
figuration la plus courante. Pour des raisons pratiques, la plupart des alternateurs sont construits de façon que les boucles soient montées sur une partie fixe et les pôles magnétiques sur une partie mobile.

La partie de la machine sur laquelle les pôles magnétiques sont placés est appelée *inducteur*. Puisque celui-ci est généralement la partie mobile ou rotative, il est également appelé *rotor*. La partie de la machine contenant les boucles dans lesquelles la tension est induite est appelée *induit*. Celui-ci est généralement la partie fixe; il est également appelé *stator*. (On utilise parfois indifféremment les termes «rotor» et «inducteur», ainsi que les termes «stator» et «induit».)

On trouve ce type de configuration dans l'alternateur bipolaire de la **figure 4**(*a*) et (*b*). L'aimant polaire inducteur tourne à l'intérieur du stator. Les boucles de l'induit sont placées dans des fentes axiales (parallèles à l'arbre) tout autour de la surface interne du stator (une seule boucle inductrice et trois paires de fentes seulement sont représentées sur la figure). Lorsque le rotor se trouve dans la position indiquée en (*a*), tout le flux magnétique, représenté en pointillé, relie (coupe) la boucle inductrice.

La **figure 4**(*b*) représente le rotor au bout de 90°, au moment où aucun flux ne coupe la boucle.

Fig. 4. Dans la plupart des alternateurs, c'est l'inducteur, ou les pôles inducteurs, qui tournent, et non la boucle. Vous noterez que la boucle est en réalité logée dans des fentes aménagées dans la surface interne du stator, également appelée «culasse».



7 Circuit magnétique

Dans l'alternateur à champ rotatif de la figure 4, (*a*) et (*b*), le circuit, ou chemin magnétique, est indiqué par les lignes en pointillé. **Le chemin commence à partir d'un pôle inducteur et traverse l'entrefer qui sépare le rotor du stator. Le chemin passe ensuite à travers la boucle de l'induit, autour du stator, et retraverse l'entrefer avant d'arriver au pôle inducteur suivant.**

Vous noterez que le flux se divise après avoir traversé l'entrefer: une moitié se dirige dans le sens des aiguilles d'une montre et l'autre moitié dans le sens inverse, vers le pôle inducteur suivant. Tous les alternateurs dont nous parlerons dans le cours ont un circuit magnétique similaire. La plus grande partie du chemin traverse du fer ou de l'acier, mais une petite partie traverse l'air, dans la mesure ou il faut un vide (d'air) entre le rotor et le stator. Puisque l'air offre une opposition (résistance magnétique) beaucoup plus forte que le fer au flux magnétique, le chemin traversant l'air (l'entrefer), bien que relativement court, constitue une partie importante du circuit magnétique.

8 Électro-aimants utilisés comme pôles inducteurs

Jusqu'à présent, nous avons supposé que le flux magnétique constituant l'inducteur de l'alternateur était produit par un aimant permanent. Il est vrai que l'on utilise des aimants permanents pour créer l'inducteur de certains alternateurs, mais les *électro-aimants* sont plus couramment utilisés. **Un électro-aimant est produit lorsqu'on fait circuler un courant continu dans une boucle enroulée autour d'un noyau en fer.** L'avantage des électro-aimants sur les aimants permanents est lié au fait qu'ils peuvent être fabriqués dans n'importe quelle dimension et que l'on peut faire varier leur puissance en modifiant l'intensité du courant dans la boucle.

Exercice de contrôle 1

Vous allez maintenant faire une petite pause pour réviser quelques points-clés. Si vos réponses sont différentes des nôtres, vous trouverez l'explication en vous reportant à la section indiquée en face de chaque réponse.

Vos réponses

1. Une machine qui produit une tension alternative est appelée («moteur primaire», «alternateur») _____ .

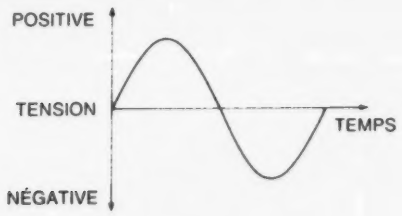
1. _____

2. Dans une génératrice de c.a., la tension maximale est produite lorsque la boucle coupe la (plus faible, plus forte) _____ quantité de flux.

2. _____

3. L'onde de tension alternative représentée ci-dessous correspond à la succession de la moitié positive et de la moitié négative d'une onde sinusoïdale. Cette succession est appelée (pôle, cycle) _____ .

3. _____



4. Si la succession d'une tension alternative est répétée soixante fois en une seconde, on dit que la fréquence est de _____ Hz.

4. _____

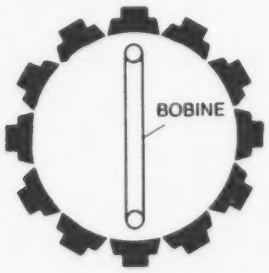
5. La succession de la tension alternative illustrée à la question 3 représente un angle de _____ degrés.

   A. 120
   B. 240
   C. 360
   D. 720

5. _____

6. Au cours d'une révolution de la boucle, le pôle de l'alternateur représenté ci-dessous va produire _____ cycles de tension alternative.

6. _____

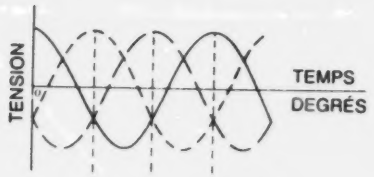


   A. 4
   B. 6
   C. 8
   D. 12

Voir les réponses à la page suivante.

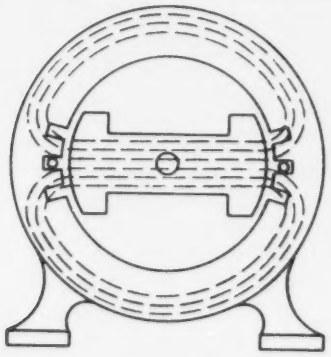
7. Si un alternateur de 20 pôles tourne à 240 tours/minute, la fréquence de la tension produite sera de: 7. _____
   A. 20 Hz *C.* 40 Hz
   B. 36 Hz *D.* 60 Hz

8. Dans un alternateur triphasé, les tensions induites sont déphasées de (120, 260) _____ degrés l'une par rapport à l'autre, comme on peut le voir ci-dessous. 8. _____



9. Les pôles magnétiques font partie de (l'inducteur, l'induit) _____ d'un alternateur. 9. _____

10. Le chemin représenté en pointillé dans l'illustration ci-dessous est appelé circuit (électrique, magnétique) _____ . 10. _____



Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 1

1. alternateur — Section 1
2. la plus forte — Section 2
3. cycle — Section 2, figure 1*b*)
4. 60 — Section 2
5. C 360 — Section 4
6. B 6 — Section 4, règle (Il y a 12 pôles, donc $12 \div 2 = 6$ cycles.)
7. C 40 Hz — Section 4
$$f = \frac{V \times P}{120} = \frac{240 \times 20}{120} = 40 \text{ Hz}$$
8. 120 — Section 5, figure 3(*b*)
9. l'inducteur — Section 6
10. magnétique — Section 7, figure 4

Composants de l'alternateur

9 Inducteur et induit

Les principaux composants d'un alternateur sont l'inducteur et l'induit. L'*inducteur* est formé par des électro-aimants disposés de façon que les pôles nord et sud soient alternativement répartis dans le champ, comme sur la figure 2; les pôles adjacents sont de polarité opposée. Les électro-aimants sont des bobines à noyau en fer alimentées en courant continu. La direction du courant est telle que la *polarité désirée* apparaît toujours à une extrémité donnée de la bobine. La puissance et le nombre des pôles sont tels qu'ils fournissent le nombre de *lignes* de *force* nécessaires pour relier les conducteurs de l'induit.

Dans la plupart des alternateurs modernes, le circuit inducteur (les pôles) est monté sur la partie rotative de la machine et est appelé *rotor*. Il est parfois plus pratique de laisser se déplacer les conducteurs de l'induit dans le champ magnétique. De toute façon, le résultat est le même: **le mouvement relatif entre les lignes magnétiques et les conducteurs induit une tension dans les conducteurs.**

La partie gauche de la **figure 5** représente le rotor d'un alternateur. Le courant est fourni aux électro-aimants (pôles) par les conducteurs placés sur l'un des rayons du croisillon du rotor. Les conducteurs, à leur tour, sont raccordés aux bagues du collecteur. Dans la partie droite se trouve un *stator* muni de nombreuses bobines inductrices dans lesquelles la tension est produite. Toutes ces bobines inductrices sont portées par une culasse en fer. Dans ce support, elles constituent la partie de l'alternateur appelée *induit*.

La **figure 6** représente un alternateur quadripolaire. Le rotor porte les pôles ***N***, ***S***, N_1 et S_1. Le courant continu alimentant les pôles est fourni par une petite génératrice de c.c. (courant continu) appelée *excitatrice*. Le courant circule à partir des bornes de l'excitatrice et traverse les balais pour alimenter les bagues collectrices. Les flèches dessinées sur les enroulements au tour des pôles indiquent la direction du courant conventionnel. La direction du flux de courant indiquée sur la figure fait en sorte que les noyaux des pôles sont magnétisés et jouent le rôle de pôle nord ou sud. Le rotor tourne

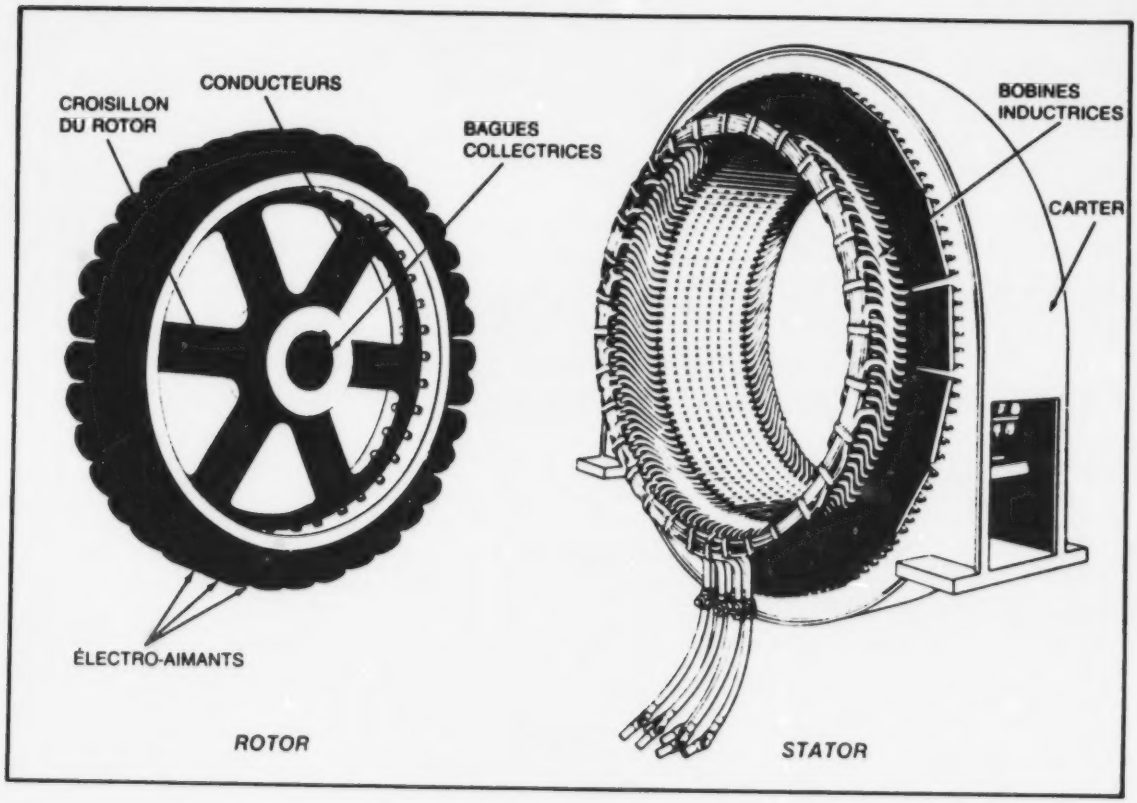


Fig. 5. Le rotor à pôles saillants représenté ici est muni de 36 pôles électromagnétiques («saillant» signifie «qui ressort ou qui dépasse»). Ces pôles sont connectés de façon que les pôles adjacents soient de polarité opposée. Le stator est muni de conducteurs logés dans les fentes de la culasse et connectés de telle manière qu'ils forment des circuits fermés.

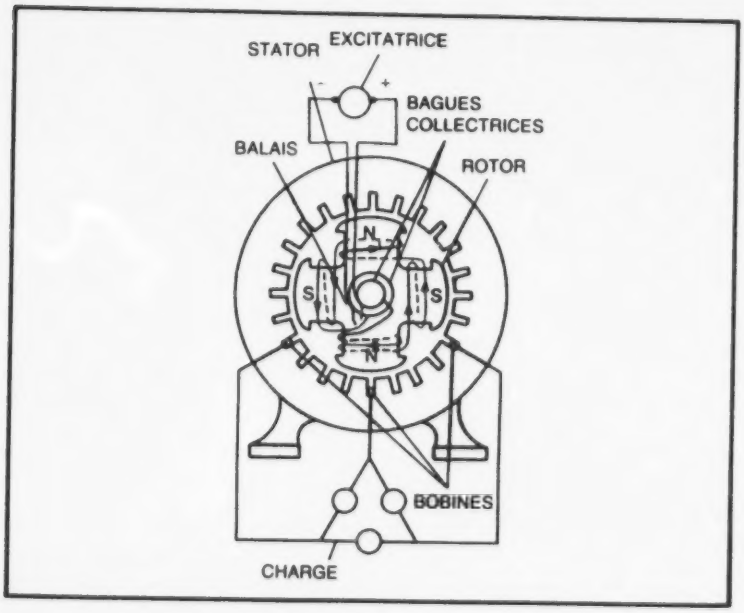


Fig. 6. L'alternateur quadripolaire représenté ici est un alternateur triphasé. Cela veut dire que ses conducteurs sont connectés dans trois circuits. Trois lignes relient l'alternateur à la charge montée en triangle (Δ).

sur un arbre (non représenté sur la figure) à l'intérieur du stator qui a un noyau en fer muni de fentes dans lesquelles sont logées les bobines.

10 Moteur primaire

L'arbre du rotor de l'alternateur est entraîné par une source extérieure de puissance mécanique appelée *moteur primaire*. Le moteur primaire peut être une machine à vapeur ou une turbine à vapeur. La vapeur peut être produite par une chaudière à charbon, à gaz ou à réaction nucléaire, dans une centrale appelée *centrale thermique*. Dans une *centrale hydraulique*, c'est la puissance d'une chute d'eau qui est utilisée pour faire tourner la turbine hydraulique servant de moteur primaire.

Les moteurs diesel et à essence, ou les machines à vapeur, sont également utilisés comme moteurs primaires; leur vitesse de rotation varie de 180 à 1200 tours/minute. Les alternateurs fonctionnant à des vitesses supérieures utilisent généralement des turbines hydrauliques ou à vapeur comme moteurs primaires. Ces alternateurs sont étudiés plus loin dans le présent cours.

11 Excitatrice

Un alternateur doit avoir un inducteur constant qui reste toujours dans la même direction. Ainsi, ses enroulements inducteurs doivent être raccordés à une source externe de courant continu. Une de ces sources est une génératrice auxiliaire à courant continu qui est soit entraînée par un moteur séparé, soit montée sur le même arbre que l'alternateur et entraînée par le même moteur primaire.

Cette génératrice auxiliaire est appelée excitatrice. Sauf dans le cas des grandes centrales, l'excitatrice est généralement couplée directement sur l'arbre de l'alternateur. Ce type de construction implique que chaque alternateur soit équipé de sa propre excitatrice. La tension nominale d'une excitatrice courante est de 125 V. Sur les alternateurs de grande puissance, la tension de l'excitatrice peut aller jusqu'à 250, 375, voire 500 V.

Pour qu'un alternateur fonctionne convenablement, son inducteur doit être alimenté par un courant continu constant. La régulation précise du courant d'excitation est obtenue au moyen d'enroulements inducteurs multiples prévus sur l'excitatrice. Les circuits électroniques réagissent encore plus rapidement aux changements de tension.

12 Excitatrice statique

Au lieu d'utiliser une excitatrice directement couplée ou un groupe moteur primaire-génératrice, certains alternateurs sont alimentés en courant continu d'excitation par des excitatrices statiques. Ces excitatrices sont munies de redresseurs métalliques, comme les redresseurs (secs) au sélénium, ou de redresseurs à semiconducteurs au silicium. Les excitatrices à courant continu ont un coût initial et des frais d'entretien assez élevés. Les redresseurs statiques ont un coût initial un peu moins élevé et, dans la mesure où ils ne comportent ni balais, ni pièces mobiles, ils sont moins chers à entretenir.

Un *système d'excitation sans balais* utilise un alternateur et un redresseur, au lieu d'une excitatrice à courant continu. Comme son nom l'indique, ce système élimine les balais utilisés dans les excitatrices traditionnelles, à savoir les balais placés sur les bagues collectrices dans l'inducteur de l'alternateur et ceux placés sur le commutateur de l'excitatrice. L'alternateur-excitatrice et le redresseur à semiconducteurs sont montés directement sur l'arbre de l'alternateur principal; le courant continu produit par le redresseur alimente directement l'inducteur de l'alternateur. L'inducteur de l'alternateur-excitatrice est fixe; un régulateur de tension règle le courant inducteur de l'alternateur-excitatrice.

13 Construction du stator

La partie fixe de l'alternateur se compose essentiellement d'un noyau en acier laminé (stratifié), de son support (carter) et des bobines du stator logées dans les fentes prévues sur la surface cylindrique interne du noyau laminé. Des capots (protections) sont fixés sur le carter et se prolongent jusqu'aux extrémités des bobines du stator pour les protéger des dommages mécaniques.

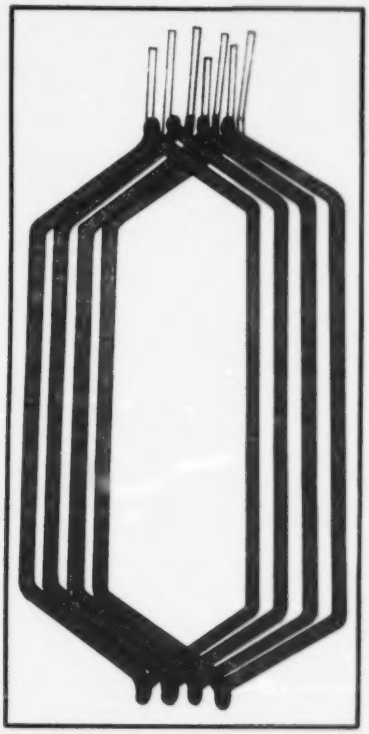


Fig. 7. Les bobines du stator, comme les quatre bobines en losange représentées ici, sont fabriquées en fil de cuivre plein ou torsadé. Chaque spire doit être isolée des autres spires, et l'ensemble de la bobine doit être isolé du noyau du stator.

Le carter est généralement fabriqué dans une tôle d'acier, afin de fournir la résistance mécanique requise par la machine.

Le noyau du stator est constitué par des feuilles (couches) perforées, fabriquées dans des tôles d'acier minces. Le noyau en acier offre un chemin à faible réluctance pour le flux magnétique. On utilise des feuilles minces pour limiter les pertes qui se produisent dans l'acier, en raison du changement de flux magnétique. Comme dans les autres machines rotatives, la perte magnétique est appelée *perte dans le fer;* il s'agit d'une perte par courant de Foucault et par hystérésis.

Les bobines de stator caractéristiques comme le représente la **figure 7** sont conçues pour venir se loger dans les fentes du noyau du stator. L'enroulement est construit de manière que deux côtés de la bobine soient placés dans chaque fente, d'où le nom d'*enroulement à deux couches.*

14 Couplage des enroulements du stator

Si l'alternateur est conçu pour fournir une tension monophasée, toutes les bobines du stator sont connectées en série pour former un circuit fermé. Cependant, la plupart des alternateurs sont conçus pour fournir une tension triphasée. Par conséquent, les bobines du stator sont couplées de manière à former trois enroulements distincts et indépendants qui sont électriquement décalés de 120° l'un par rapport à l'autre.

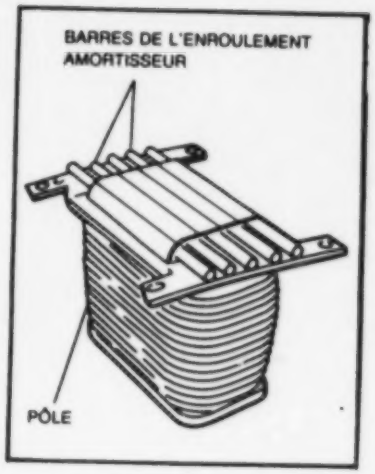
La tension totale produite dans l'un quelconque de ces enroulements ou phases, est appelée *tension de phase* de l'alternateur. Les trois enroulements peuvent être raccordés à un point commun pour former un alternateur à *montage en étoile,* également appelé «montage en Y». Ils peuvent également être raccordés, bout à bout, pour former un alternateur à montage en *triangle* (Δ). En règle générale, trois conducteurs d'extrémité sont dégagés des enroulements interconnectés. Dans un alternateur monté en étoile, le point neutre peut également être mis à la terre pour assurer la protection des enroulements.

15 Construction du rotor

Le rotor de l'alternateur renferme normalement les pôles ou l'inducteur. Le nombre de pôles et la forme (profil) du rotor dépendent de la vitesse de rotation de celui-ci. Il existe deux formes de rotor, à savoir le rotor à pôles saillants et le rotor rond ou cylindrique.

La figure 5 représente un exemple de rotor à *pôles saillants*. Ce type de rotor renferme plusieurs noyaux magnétiques laminés montés sur le corps du rotor, également laminé. Toutes les bobines du rotor sont enroulées dans la même direction. Afin que les pôles adjacents soient de polarité opposée, le courant circule de haut en bas dans une bobine, et de bas en haut dans la bobine adjacente.

Dans certains alternateurs, on trouve un enroulement à masse polaire en plus de l'enroulement inducteur. Les enroulements à masse polaire, qu'on appelle «amortisseur» ou «enroulement en court-circuit», sont constitués de barres de cuivre ou de bronze insérées dans des trous prévus à cet effet, à proximité de la surface de l'entrefer du pôle. Les barres sont raccordées entre elles à leurs extrémités par brasure soit sur les plaques d'extrémité des pôles, soit sur une barre de court-circuit. Elles sont parfois couplées de pôle à pôle. Les barres ne sont pas isolées des pôles. Les enroulements amortisseurs remplissent deux fonctions: ils réduisent les fluctuations de vitesse et empêchent l'apparition de très hautes tensions déséquilibrées pendant les courts-circuits. L'enroulement amortisseur est un élément important lorsque le moteur primaire est un moteur diesel ou un autre type de moteur alternatif.



Les alternateurs, dans le cas où les moteurs primaires sont des turbines à vapeur, tournent à grande vitesse et sont équipés, au lieu de rotors à pôles saillants, de rotors *cylindriques* (ronds), comme le montre la **figure 8.** Les enroulements inducteurs sont placés dans des fentes radiales situées dans le corps du rotor et non autour du corps des pôles saillants. Plusieurs bobines raccordées en série sont prévues pour fournir la force magnétique requise.

Dans les bobines, on utilise couramment un ruban en cuivre dur recourbé sur le rebord, bien que la conception de certaines bobines nécessite un alliage d'aluminium. Les conducteurs sont nus; les spires sont isolées entre elles par des lamelles de mica ou un autre matériau isolant.

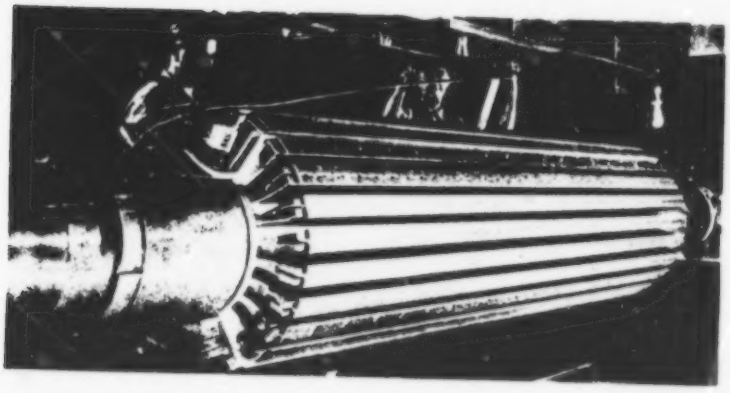


Fig. 8. Un rotor cylindrique a une forme longue et étroite pour résister à la fatigue mécanique due à la grande vitesse de rotation.

16 Balais

Les extrémités de l'enroulement inducteur sont couplées à des bagues collectrices montées sur l'arbre et isolées de celui-ci. Des balais fixes en carbone maintenus contre la surface des bagues acheminent le courant continu inducteur de l'excitatrice vers les bobines inductrices, en passant par les bagues rotatives.

Les balais sont généralement fabriqués dans un carbone tendre, appelé «graphite naturel». Ils sont placés dans des porte-balais qui les maintiennent à un angle convenable par rapport aux bagues collectrices. La pression convenable des balais est un paramètre essentiel pour assurer leur bonne performance. Un ressort doit être prévu pour régler avec précision la pression des balais. Il doit également être capable de maintenir une pression constante pendant toute la durée d'utilisation des balais. Le porte-balais et le ressort sont généralement maintenus en place par un goujon isolé qui fait partie intégrante du support du porte-balais.

Le nombre de balais dépend de l'intensité du courant d'excitation que les balais doivent recevoir. Sur chaque balai est fixé un fil guipé souple en vrille, également appelé «shunt». La vrille «queue de cochon» est raccordée au porte-balais (ou à une barre omnibus en cuivre) pour fournir au courant un chemin à faible résistance entre le balai et le circuit externe.

Exercice de contrôle 2

Il est temps de faire une deuxième pause pour vérifier vos connaissances. Comparez vos réponses aux nôtres et, si nécessaire, révisez les sections citées en référence.

Vos réponses

1. Les deux principaux composants d'un alternateur sont _____ et _____ . — 1. _____

2. Des diagrammes suivants, quel est celui qui représente la disposition correcte des pôles inducteurs pour un alternateur? — 2. _____

A.

C.

B.

D.

3. L'arbre du rotor d'un alternateur est entraîné par (le croisillon du rotor, le moteur primaire) _____ . — 3. _____

4. Si votre contremaître vous disait que la machine sur laquelle vous travaillez est équipée d'une excitatrice statique au sélénium, vous sauriez qu'elle est dotée (de pièces rotatives, de redresseurs secs) _____ . — 4. _____

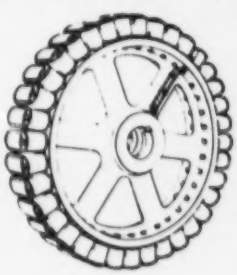
5. Pourquoi le noyau d'un stator est-il fabriqué dans des tôles d'acier minces? — 5. _____

6. Quels types de montages d'enroulements de stator représentent les deux symboles ci-après? — 6. Y _____ Δ _____

Y Δ

7. Le rotor *A* est un rotor du type _____ et le rotor *B* est un rotor du type _____ . — 7. _____

A.

B. 

Voir les réponses à la page suivante.

Vos réponses

8. D'après vous, lequel des deux rotors (A ou B) illustrés à la question 7 est conçu pour une application à grande vitesse? 8. _____

9. Les balais d'un alternateur sont généralement fabriqués en (mica, graphite) _____ . 9. _____

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 2

1. l'inducteur; l'induit — Section 9
2. *D* — Section 9; figures 5, 6 (Ce n'est que dans le diagramme *D*, que les pôles adjacents ont une polarité opposée [*N-S-N-S-N-S*].)
3. Le moteur primaire — Section 10
4. de redresseurs secs — Section 12
5. Pour minimiser les pertes dans le fer. — Section 13
6. Y: montage en étoile; Δ: montage en triangle — Section 14
7. A cylindrique — Section 15, figure 8
8. A (cylindrique) — Section 15
9. graphite — Section 16
B à pôles saillants — Section 15, figure 5

Caractéristiques nominales des alternateurs

17 Valeur nominale standard

La *valeur nominale* d'un alternateur dépend de sa charge, c'est-à-dire de l'appareillage électrique qu'il doit alimenter. La puissance active (également appelée puissance réelle, exprimée en kilowatts), la tension et les facteurs de puissance de la charge doivent être pris en considération. Il est important de connaître l'importance de la charge (en kilowatts) et la fréquence à laquelle la charge sera mise en marche ou arrêtée à tout moment: la mise en marche soudaine d'une forte charge entraînera une baisse de tension et de vitesse de l'alternateur. Pour assurer le bon fonctionnement de l'alternateur, il faut que la tension et la vitesse soient maintenues constantes.

Pour répondre aux besoins variables des utilisateurs d'énergie électrique, la National Electrical Manufacturers Association[1] a fixé des valeurs normalisées pour la *puissance*, la *tension* et le *facteur de puissance*. Le tableau 1 donne certaines valeurs nominales en kilowatts pour les alternateurs, pour un facteur de puissance de 80 %. Une liste de tensions nominales pour les alternateurs est donnée au tableau 2 et les gammes de tension et de puissance nominales pour les alternateurs sont reproduites au tableau 3.

TABLEAU 1

Puissances nominales standard (partielles) en kilowatts pour les alternateurs, pour un facteur de puissance de 80%

400	4 000
500	4 500
600	5 000
700	6 000
800	7 000
900	8 000
1 000	10 000
1 250	12 500
1 500	15 000
1 750	20 000
2 000	25 000
2 250	30 000
2 500	35 000
3 000	40 000
3 500	50 000
	60 000

TABLEAU 2

Tensions nominales standard pour les alternateurs

125
230
460
575
2 400
2 500
4 160
4 330
6 900
13 800
14 400

TABLEAU 3

Gammes de tensions et de puissances nominales standard pour les alternateurs

Puissance en kilowatts	Tension, en volts					
	125-230	460-575	2400	4160	6900	13 800
Moins de 500	X	X				
500- 1 500		X	X	X		
1 750- 4 000			X	X		
4 500- 6 000			X	X	X	
7 000-15 000					X	X
20 000 et plus						X

1 La NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION est un organisme ayant juridiction aux USA.

D'autres normes relatives aux valeurs et au rendement sont établies par l'American National Standard Institue (ANSI) (Institut national américain de nationalisation), qui s'appelait auparavant «United States of America Standards Institute» (USASI) (Institut américain de normalisation) et par l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)[1] (Institut des ingérieurs électriciens et électroniciens).

Si une tension nominale comprise dans la gamme de valeurs nominales ne répond pas aux besoins de l'utilisateur ou de l'utilisatrice, elle peut être réglée à la valeur requise au moyen d'un transformateur placé entre l'alternateur et la charge.

18 Régulation de la tension

La tension d'un alternateur dépend de sa vitesse et de l'intensité du courant inducteur. On ne *peut pas* faire varier la vitesse, parce que tout changement de vitesse entraînerait un changement de fréquence du système. Par conséquent, on règle la tension en faisant varier le courant inducteur de l'alternateur au moyen d'un rhéostat de champ (résistance variable), ou en faisant varier le courant inducteur de l'excitatrice. Dans un système à régulation automatique, le rhéostat de champ est entraîné par un moteur.

Un régulateur de tension automatique maintient une certaine tension dans la génératrice en réglant le moteur rhéostat de champ. **Le régulateur de tension règle le courant inducteur au niveau requis par la charge.**

19 Choix de la valeur nominale d'un alternateur

Supposons maintenant que nous devions sélectionner l'alternateur approprié comme source d'alimentation auxiliaire ou de secours pour une petite usine industrielle. L'usine a une puissance installée totale de 525 kW (kilowatts) pour un facteur de puissance de 80%. Normalement, cette puissance doit être fournie par le secteur, à l'aide d'un transformateur de 2300 V.

La charge se répartit en *utilisations monophasées et triphasées*. Les utilisations monophasées sont des lampes, des moteurs de puissance inférieure à 1 hp, des appareils électriques et autres petits équipements qui sont, dans la mesure du possible, également répartis dans les trois phases du circuit. Les utilisations tri-

1 La IEEE est un organisme ayant juridiction aux U.S.A.

phasées sont des moteurs triphasés conçus pour un démarrage à pleine tension. Les plus grosses machines ont deux moteurs de 75 hp (horse-power[1]) et un moteur à induction à cage d'écureuil de 100 hp.

Si l'on se réfère au tableau 1, on voit que la puissance nominale la plus proche est de 600 kW, pour un facteur de puissance de 80%. Les alternateurs sont conçus pour fonctionner de manière satisfaisante dans une fourchette de plus ou moins 5% par rapport à la tension nominale. Par conséquent, la tension nominale de 2400 V indiquée au tableau 3 serait appropriée pour la charge considérée, soit 2300 V.

Dans un alternateur fonctionnant à ce régime, le moteur primaire pourrait être un moteur à essence ou un moteur diesel. Des moteurs primaires de ce type sont couramment utilisés sur des alternateurs variant de 1200 à 1500 kW. Les alternateurs de moindre puissance sont couramment construits pour une vitesse de rotation comprise entre 1200 et 1800 tours/minute et les alternateurs de plus grande puissance, pour une vitesse de 514 ou 600 tours/minute. Les groupes moteurs-génératrices sont conçus de telle manière que les spécifications mécaniques de l'alternateur correspondent à celles du moteur.

20 Régulation de la vitesse

La meilleure description du fonctionnement d'un régulateur de vitesse sur un alternateur est donnée par l'exemple suivant. Un petit alternateur auxiliaire, entraîné par un moteur à essence, sert à alimenter un équipement spécial dans une usine donnée. Le moteur est équipé d'un *régulateur* de vitesse, soit un dispositif qui est sensible à la vitesse du moteur et qui commande l'obturateur du moteur. Lorsque la charge du moteur augmente, celui-ci a tendance à ralentir.

L'ouverture de l'obturateur fait qu'une plus grande quantité d'essence est admise dans le carburateur, ce qui entraîne une accélération du moteur. Ce phénomène peut être comparé à la situation d'un automobiliste qui garderait le pied sur l'accélérateur pour monter une côte.

Au démarrage, l'alternateur n'est sollicité par aucune charge et il fonctionne à la *vitesse nominale*, l'obturateur presque fermé. Lorsque l'alternateur est sollicité par la charge, la vitesse du moteur commence à baisser. Le régulateur de vitesse commande l'ouverture de l'obturateur et augmente de nouveau la vitesse jusqu'au niveau correct. Si la charge est déconnectée de l'alternateur, la vitesse du moteur augmente, *mais* le régulateur commande alors la fermeture de l'obturateur pour ramener la vitesse du moteur à son niveau normal. Ainsi, l'alternateur fonctionne à la fréquence nominale tout en fournissant une puissance variable.

---

1 Ne pas confondre le horse-power (hp) avec le cheval-vapeur (ch), car le *hp* a une puissance de 746 W et le *ch* une puissance de 736 W.

21 Vitesses nominales

On ne peut fixer de normes strictes en matière de vitesse de fonctionnement des alternateurs parce que ces vitesses dépendent des conditions qui limitent la vitesse du moteur primaire. La plupart des alternateurs entraînés par une turbine à vapeur sont bipolaires et ont une vitesse de rotation de 3600 tours/minute. Certains grands turbo-alternateurs à refroidissement par air peuvent être quadripolaires, avec une vitesse de rotation de 1800 tours/minute. Les alternateurs de moindre puissance entraînés par moteur peuvent avoir une vitesse de rotation comprise entre 600 et 1200 tours/minute, alors que les alternateurs de plus grande taille fonctionnent entre 180 et 300 tours/minute. Les alternateurs à turbine hydraulique peuvent être conçus pour des vitesses de rotation de 720 tours/minute au maximum et de 60 tours/minute au minimum.

22 Élévation de température

Des normes s'appliquent également aux élévations de température qui se produisent dans les différentes parties de l'alternateur, lorsqu'il fournit sa charge nominale (*charge nominale*, dans ce contexte, signifie *puissance en kilowatts*, *facteur de puissance*, *tension* et *vitesse nominales*). Les enroulements sont les parties les plus critiques de l'alternateur en ce qui concerne l'effet de la température sur la durée de service maximale.

L'isolant électrique prévu sur les enroulements est sélectionné pour assurer une durée de service raisonnable en fonction d'une température maximale donnée. Quatre types normalisés d'isolants (A, B, F et H) sont utilisés sur les alternateurs. Le tableau 4 donne les températures de service maximales pour les quatre types de matériaux en degrés Celsius (°C) et en degrés Fahrenheit (°F).

TABLEAU 4

Température de service maximale des isolants

Classe	°C (°F)
A	105° (221°)
B	130° (266°)
F	155° (311°)
H	180° (356°)

La température des enroulements est mesurée au moyen de détecteurs incorporés dans l'enroulement ou de thermomètres placés sur la surface externe d'une bobine isolée. La température peut également être déterminée en comparant les mesures de résistance.

La température de l'air de refroidissement influe directement sur la température de fonctionnement des enroulements. On peut contrôler, au stade de la conception de l'alternateur, la valeur à laquelle la température interne s'*élèvera* au-dessus de la température d'admission de l'air; mais, de manière générale, on ne peut contrôler la température de l'air extérieur utilisé pour le refroidissement de l'alter-

nateur. La pratique industrielle a donc fixé à 40°C (104°F) la température maximale permise de l'air de refroidissement, température pour laquelle un alternateur courant est conçu.

23 Surcharges

Certains alternateurs sont conçus pour pouvoir tolérer une surcharge, ce qui entraîne une double élévation de température. Par exemple, un gros alternateur isolé de type B peut être conçu pour pouvoir tolérer, à *pleine charge*, une élévation de température de 60°C (108°F). Et, pour une *surcharge* de 15%, il pourrait tolérer une élévation de température de 80°C (144°F). Ces régimes sont tolérés *à condition* que la température soit déterminée par un détecteur ou une résistance. Si la surcharge est de courte durée, la température de l'alternateur sur la surcharge peut dépasser légèrement la température maximale admissible pour le type d'isolant considéré.

Par exemple, un petit alternateur isolé de type A peut tolérer une élévation de température de 40°C (72°F) à pleine charge *et* une élévation de 55°C (99°F) pour une surcharge de 25% pendant 2 heures sur une période de 24 heures. Certains utilisateurs, pour obtenir des alternateurs conçus pour des régimes plus bas, peuvent demander au fabricant d'utiliser un isolant du type B, mais avec les limites de température prévues pour les matériaux du type A. Cependant, cela entraîne une augmentation du coût de fabrication de l'alternateur.

Ces élévations de température sont fixées par des normes industrielles. Elles figurent sur la plaque de signalisation de l'alternateur, avec la température maximale de l'air de refroidissement pour laquelle le matériel a été conçu.

24 Ventilation des alternateurs

Des pertes de différentes natures se produisent dans un alternateur, comme les pertes dans le fer, les pertes par effet Joule (dans les enroulements), les pertes par courant de Foucault, ainsi que différentes pertes supplémentaires. (Vous vous souviendrez que la puissance est donnée par la formule $P = I^2 R$. Donc, la perte

ou perte par effet Joule). Chacune de ces pertes se traduit par l'apparition de chaleur, chaleur qui doit être dissipée pour éviter que les élévations de température des différents composants deviennent excessives. L'alternateur est par conséquent ventilé pour dissiper la chaleur produite par les pertes.

Bien que d'autres méthodes soient utilisées pour refroidir les alternateurs, la méthode la plus courante consiste à assurer un débit d'air suffisant dans l'alternateur pour maintenir l'élévation de température dans les limites normales. Des canaux de ventilation sont prévus dans le noyau pour assurer un passage d'air sur les bobines du stator et les tôles magnétiques. Pour atteindre ces canaux, l'air passe entre les bobines du rotor et les masses polaires. Une certaine quantité d'air passe sur les extrémités des bobines du stator pour dissiper la chaleur produite à ce niveau.

L'action de ventilateur créée par la rotation du rotor entraîne une certaine quantité d'air à travers les canaux de ventilation et sur les extrémités des bobines, mais des ventilateurs spéciaux sont généralement prévus pour augmenter le débit d'air. Le type le plus simple de ventilateur est constitué par des pales en tôle fixées sur le bord du rotor. Lorsqu'une ventilation plus forte est requise, on peut utiliser un ventilateur centrifuge ou un ventilateur à débit axial qui déplace l'air parallèlement à l'arbre.

Il est important que l'air de ventilation soit propre et frais. On utilise à cette fin des purificateurs et des systèmes de recyclage d'air.

Les gros turbo-alternateurs utilisent comme milieu de refroidissement l'hydrogène gazeux au lieu de l'air. L'hydrogène est plus léger que l'air, il provoque moins de pertes dans les enroulements par ventilation et dissipe plus rapidement la chaleur. Un alternateur refroidi à l'hydrogène doit être entièrement fermé pour permettre au gaz de circuler de nouveau dans les différents composants à une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique.

À la place de l'hydrogène, on peut utiliser un liquide pour refroidir l'alternateur; en fait, un liquide peut transférer la chaleur beaucoup plus efficacement qu'un gaz. Des pompes doivent être prévues et disposées de telle sorte que le liquide puisse circuler dans le bâti.

Exercice de contrôle 3

Vous allez maintenant pouvoir réviser vos connaissances sur les valeurs nominales des alternateurs en répondant au petit questionnaire suivant. Pour vérifier vos connaissances, comparez vos réponses aux nôtres. Si vous vous êtes trompé en cours de route, n'oubliez pas de revoir la section citée en référence.

Vos réponses

1. La valeur nominale d'un alternateur dépend de (sa puissance en ch., sa charge) _____ . — 1. _____

2. Si vous deviez changer la tension fournie par un alternateur à vitesse constante, vous régleriez (le facteur de puissance, le courant inducteur) _____ de l'alternateur (ou de son excitatrice). — 2. _____

3. Supposez que vous deviez sélectionner un alternateur avec une tension nominale standard pour une charge de 9000 kW. Vous choisiriez un alternateur dont la tension minimale serait de: — 3. _____
   A. 230 V. *C.* 4160 V.
   B. 575 V. *D.* 6900 V.

4. Si les changements de température risquent de susciter des problèmes, les composants les plus critiques de l'alternateur sont les: — 4. _____
   A. balais. *C.* bagues collectrices.
   B. enroulements. *D.* barres d'amortisseurs.

5. Supposez que vous deviez refaire les enroulements de certaines bobines sur un alternateur dont la température maximale de service est de 160°C. L'isolant requis serait du type: — 5. _____
   A. A. *C.* F.
   B. B. *D.* H.

6. Les gros turbo-alternateurs utilisent (le gaz carbonique, l'hydrogène gazeux) _____ comme milieu de refroidissement.

Dans l'espace réservé en face de chaque groupe de mots de la colonne de droite, inscrivez la lettre correspondant à la phrase suivante qui l'explique le mieux.

7. *a.* Type de perte dans l'alternateur. — 7. ___ 40
   b. Une des tensions nominales standard d'un alternateur. ___ kW
   c. Température maximale admissible (en degrés Celsius) de l'air de refroidissement pour les machines. ___ régulateur
   d. Organisme responsable de l'établissement des normes en matière de caractéristiques électriques nominales. ___ I^2R
   e. Dispositif de régulation de vitesse. ___ IEEE
   f. Unité de puissance active. ___ 460

Voir les réponses à la page suivante.

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 3

1.	sa charge	Section 17
2.	le courant inducteur	Section 18
3.	*D* 6900 V	Sections 17, 19 tableau 3
4.	*B* enroulements	Section 22
5.	*D H*	Section 22, tableau 4
6.	l'hydrogène gazeux	Section 24
7.	*c* 40	Section 22
	f kW	Sections 17, 19
	e régulateur	Section 20
	a I^2R	Section 24
	d IEEE	Section 17
	b 460	Section 17, tableau 2

Fonctionnement des alternateurs

25 Fonctionnement sur grand système électrique

Outre le fait qu'ils règlent la *vitesse* et la *tension*, les régulateurs de vitesse et de tension déterminent également le mode selon lequel un alternateur fonctionnera sur un très grand système électrique ou sur un système électrique infini. Un ***système électrique infini*** est un système électrique d'une taille telle que le fonctionnement d'une quelconque génératrice n'influe ni sur la tension, ni sur la fréquence du système. Un alternateur raccordé à un système électrique infini fonctionne à la vitesse nominale du système, même en l'absence d'un régulateur de vitesse. Dans ce cas, le régulateur de vitesse sert davantage à régler la charge que la vitesse.

La quantité de puissance qui sera fournie au système électrique par l'alternateur peut être réglée en changeant le réglage du contrôleur. Lorsqu'on augmente le réglage du régulateur, l'obturateur s'ouvre et la vitesse du moteur tend à augmenter. Le système électrique maintient la vitesse du moteur à son niveau nominal, mais une plus grande ouverture de l'obturateur se traduit par une augmentation de la puissance fournie par le moteur au système électrique.

Un alternateur raccordé à un système électrique infini doit également fonctionner à la tension nominale. Le régulateur de tension règle le courant inducteur pour régler le facteur de puissance de l'alternateur. Le système électrique doit, bien sûr, fournir le facteur de puissance moyen correspondant à la charge à laquelle il est raccordé. Le *facteur de puissance* est déterminé par la puissance réactive totale, exprimée en kilovolt-ampères réactifs (kvar) sur le système électrique. La puissance réactive totale peut être répartie sur les différents alternateurs en réglant leurs courants inducteurs respectifs. Le régulateur de tension joue donc également le rôle d'un régulateur de facteur de puissance sur un alternateur donné.

La plupart des alternateurs fonctionnent sur des systèmes électriques situés entre ces deux extrêmes. En tout état de cause, le régulateur de vitesse, en réglant la puissance fournie par le moteur primaire, règle également la puissance fournie par l'alternateur. Le régulateur de tension, en réglant le courant inducteur de l'alternateur, règle également la tension et le facteur de puissance auxquels l'alternateur fonctionnera pour une certaine puissance appelée.

26 Démarrage d'un alternateur indépendant

Si l'excitatrice est entraînée séparément de l'alternateur indépendant par son propre moteur primaire, elle doit être au niveau requis de vitesse et de tension avant que l'alternateur démarre. Cela s'explique par des raisons de commodité: en effet, au moment où l'alternateur démarre, il doit pouvoir être excité sans délai. Si l'excitatrice est directement couplée sur l'arbre de l'alternateur, cette possibilité est alors exclue. Si l'alternateur est appelé à fonctionner indépendamment et à exciter des circuits qui ne sont pas encore sous tension, il est amené au niveau de vitesse normale et excité avec un champ magnétique faible. En d'autres termes, la résistance du rhéostat est *raccordée* à la fois aux circuits inducteurs de l'alternateur et de l'excitatrice, de telle sorte que l'alternateur fournit une basse tension à fréquence normale. Ce procédé de démarrage est appliqué afin que, lorsque l'alternateur est raccordé à des circuits hors tension (dont la puissance installée peut être considérable), la pointe de courant qui se produit pendant un instant soit limitée. Tous les interrupteurs placés entre l'alternateur et les barres omnibus auxquelles il doit être raccordé sont alors fermés. La tension de l'alternateur est ensuite amenée à son niveau nominal en *disjoignant* la résistance des circuits inducteurs de l'alternateur et de l'excitatrice.

27 Arrêt d'un alternateur indépendant

La marche à suivre pour la mise en arrêt d'un alternateur indépendant, c'est-à-dire qui ne fonctionne pas en parallèle sur d'autres alternateurs, est la suivante:

1. Réduire au minimum la tension de sortie de l'alternateur au moyen d'un rhéostat de champ.
2. Ouvrir tous les interrupteurs des lignes d'alimentation.
3. Ouvrir l'interrupteur de la ligne de distribution de l'alternateur.
4. Ouvrir l'interrupteur de l'inducteur de l'alternateur.
5. Fermer le moteur primaire.

L'entretien préventif nécessaire peut ensuite être effectué.

28 Fonctionnement en série

Les alternateurs ne peuvent fonctionner en série, sauf s'ils sont mécaniquement couplés de manière à être électriquement en phase, sans que leurs rapports de phase puisse varier. Si les alternateurs n'étaient pas couplés mais entraînés séparément, la condition de phase serait instable. Autrement dit, les tensions seraient dans la même direction à un moment donné et dans la direction opposée à un autre moment. Dans un système où les alternateurs seraient raccordés en série, aucune tension ne passerait dans les circuits externes au moment où les tensions de l'alternateur seraient opposées.

29 Montage parallèle d'alternateurs monophasés

Il est plus courant de faire fonctionner plusieurs alternateurs en parallèle qu'en série. Pour monter convenablement des alternateurs en parallèle, les conditions suivantes doivent être remplies:

1. Les *tensions* doivent être *égales*.
2. Les *alternateurs* doivent fonctionner de manière presque *synchrone* avant que ne soit effectué le raccordement en parallèle.
3. Les tensions doivent être *en phase au moment* où l'on effectue le raccordement.

Immédiatement après que le raccordement des alternateurs en parallèle aura été effectué, les unités doivent fonctionner de manière parfaitement synchrone.

La première condition doit être remplie pour éviter la présence d'un renvoi de courant important entre les alternateurs après le raccordement; la deuxième condition, pour permettre à l'alternateur qui va entrer en service de se mettre en phase avec celui qui fonctionne déjà; et la troisième condition, pour éviter que les induits, et éventuellement le moteur primaire (si une génératrice devait court-circuiter l'autre), ne soient sérieusement endommagés. Après le raccordement, il faut un *synchronisme parfait* pour éviter que les alternateurs ne soient déphasés ou décalés, ce qui provoquerait un court-circuit.

Les *observations* permettant de déterminer les rapports de phase convenables entre les alternateurs à raccorder en parallèle peuvent

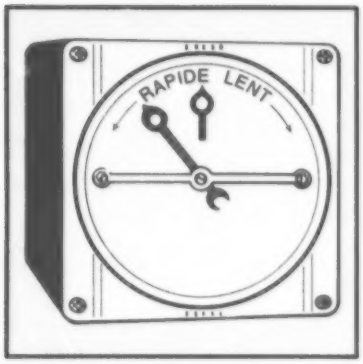


Fig. 9. Avant de raccorder les alternateurs en parallèle, il faut utiliser un compteur comme ce synchronoscope pour vérifier que les alternateurs sont bien en phase.

être faites suivant différentes méthodes, à savoir: utilisation de lampes de synchronisation; d'un voltmètre raccordé en parallèle avec les lampes de synchronisation; d'un voltmètre raccordé convenablement entre les lignes de tension à partir de l'alternateur; d'un synchronoscope (**fig. 9**). L'utilisation de lampes est une méthode simple de synchronisation, mais c'est la moins faible.

30 Fonctionnement correct d'alternateurs montés en parallèle

Lorsque les alternateurs fonctionnent en parallèle, les conditions suivantes doivent être remplies:

1. Les *lectures données par le wattmètre* doivent être proportionnelles aux caractéristiques électriques nominales des alternateurs.
2. Les *facteurs de puissance* des différents alternateurs doivent être les mêmes.
3. Le *courant* des différents alternateurs doit être proportionnel aux caractéristiques électriques nominales des alternateurs.

Si les lectures données par le wattmètre pour les différents alternateurs ne sont pas proportionnelles à leurs caractéristiques électriques nominales, cela signifie que la charge n'est pas convenablement répartie entre les alternateurs. Afin de faire passer la charge d'un alternateur à l'autre et de la répartir convenablement, il faut régler les régulateurs de vitesse sur les moteurs primaires des alternateurs.

Si les facteurs de puissance des courants fournis par les alternateurs sont différents, il faut faire en sorte qu'ils concordent. Pour ce faire, il faut déplacer les rhéostats de champ des alternateurs dans des directions opposées. Pendant ce réglage, il faut veiller à ce que la tension soit maintenue au niveau convenable.

Lorsque les lectures données par le wattmètre sont proportionnelles aux caractéristiques électriques nominales des alternateurs et que les facteurs de puissance concordent, les courants sont alors proportionnels aux caractéristiques nominales. Les alternateurs pourront dès lors fonctionner correctement en parallèle.

Lorsqu'il est nécessaire de régler la tension de secteur des alternateurs qui fonctionnent en parallèle, il faut régler les rhéostats *à la même valeur* et dans la *même direction*. Il faut également surveiller les cosinusphimètre pour s'assurer que chaque rhéostat est réglé à la même valeur. Si les lectures données par les cosinusphimètres ne changent pas, cela signifie que les rhéostats sont réglés de la même manière.

31 Arrêt des alternateurs fonctionnant en parallèle

La marche à suivre pour arrêter un alternateur fonctionnant en parallèle avec un ou plusieurs autres alternateurs est la suivante:

1. Mettre entièrement hors charge l'alternateur qui doit être arrêté, en réglant les régulateurs des moteurs primaires.
2. Régler l'inducteur de champ pour réduire le flux du courant.
3. Ouvrir l'interrupteur de la ligne de distribution.
4. Abaisser la tension au minimum à l'aide du rhéostat de champ de l'alternateur.
5. Ouvrir l'interrupteur de l'inducteur des alternateurs.
6. Arrêter le moteur primaire.

L'entretien préventif nécessaire peut ensuite être effectué.

Exercice de contrôle 4

Voici quelques questions qui vous aideront à vérifier vos connaissances sur le fonctionnement des alternateurs. Si l'une de vos réponses est fausse, avant d'aller plus loin, essayez de comprendre pourquoi en révisant la section citée en référence dans les réponses.

Vos réponses

1. Dans un système électrique infini bien régulé, la _____ et la _____ ne sont pas perturbées par le fonctionnement d'une génératrice indépendante.

   1. _____
      _____

2. Si vous devez faire démarrer un alternateur indépendant, vous devez vérifier qu'il est bien raccordé au système électrique à une tension de sortie (pleine, basse) _____ et à une fréquence (basse, normale) _____ .

   2. _____
      _____

3. Supposez que vous devez arrêter un alternateur indépendant et que la tension de sortie a été correctement abaissée. Quelle doit être la séquence d'ouverture des interrupteurs de l'inducteur, des lignes d'alimentation et de la ligne de distribution?

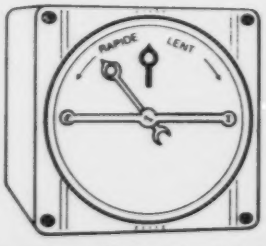
   3. Interrupteur de l'inducteur _____
      Interrupteur des lignes d'alimentation _____
      Interrupteur de ligne de distribution _____

4. Généralement, les alternateurs fonctionnent en (série, parallèle) _____ .

   4. _____

5. Lorsque vous devez raccorder des alternateurs en parallèle, vous utilisez l'appareil représenté ci-dessous pour observer les rapports de (phase, tension) _____ .

   5. _____



6. Deux alternateurs fonctionnent en parallèle, mais la charge est mal répartie entre les deux. Vous devez régler:
   A. les régulateurs de tension.
   B. les résistances de l'inducteur.
   C. les interrupteurs des lignes d'alimentation.
   D. les régulateurs de vitesse.

   6. _____

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 4

1. tension fréquence (vitesse) Section 25
2. basse normale Section 26
3. interrupteur de l'inducteur 3
   interrupteurs des lignes d'alimentation 1
   interrupteur de ligne de distribution 2 Section 27
4. parallèle Section 29
5. phase Section 29, figure 9
6. *D* les régulateurs de vitesse Section 30

Types d'alternateurs

32 Alternateurs à moteur

Les principaux types d'alternateurs sont les *alternateurs à moteur*, à *turbine hydraulique (génératrices hydrauliques)* et *à turbine à vapeur (turbo-génératrices)*.

Les *alternateurs à moteur* sont du type à pôles saillants et sont en général équipés d'un arbre horizontal. Sauf pour les régimes de vitesse les plus élevés, les alternateurs à moteur ont des pôles boulonnés. Des enroulements amortisseurs sont prévus pour compenser la tendance aux pulsations due à la vitesse de rotation du moteur. Pour réduire les fluctuations de vitesse, certains rotors d'alternateurs à moteur sont munis de volants ou de bagues de charge, comme on peut le voir sur la **figure 10**. Ces dispositifs ont pour fonction d'alourdir les rotors pour réduire les variations de vitesse.

Les alternateurs à moteur sont souvent utilisés comme source d'alimentation de secours ou auxiliaire. Ils sont conçus pour être entraînés par des moteurs diesel, à gaz ou à vapeur. La **figure 11** représente un alternateur à moteur diesel. Les alternateurs à moteur sont fabriqués dans une large gamme de vitesses et de dimen-

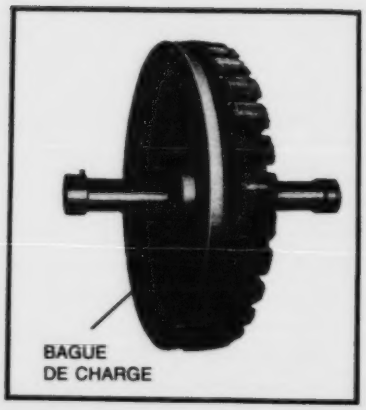


Fig. 10. Le rotor illustré ici est semblable à celui de la figure 5, sauf qu'une bague de charge y est fixée sur un côté pour réduire les variations de vitesse.

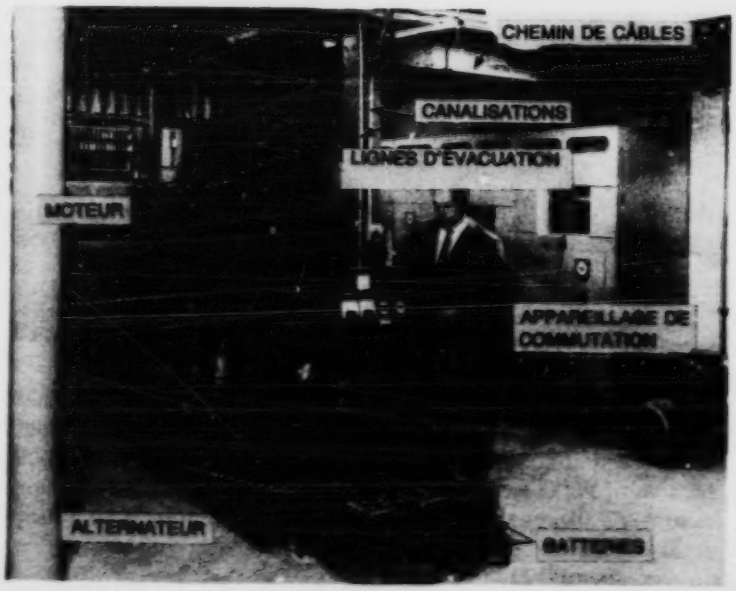


Fig. 11. Cet alternateur à moteur diesel est très probablement utilisé comme source d'alimentation de secours ou auxiliaire.

sions, mais leur vitesse nominale est généralement comprise entre 180 et 1200 tours/minute et leur puissance nominale est inférieure à 5000 kW. Leurs moteurs primaires ont une assez bonne régulation de vitesse. Par exemple, si l'on passe brutalement d'une pleine charge à une charge nulle, l'élévation de vitesse est réglée avec précision par le régulateur de vitesse du moteur.

33 Alternateurs à turbine hydraulique

Les *alternateurs à turbine hydraulique*, également appelés *génératrices hydrauliques*, sont similaires aux alternateurs à moteur. Le type de turbine hydraulique utilisée influe sur la conception de l'alternateur qu'elle doit entraîner. Il existe trois types principaux de turbine hydraulique: à *réaction* (type Francis), *à action* (type Pelton) et à *débit axial* (type à hélice). La **figure 12** représente une turbine de type Francis. Les turbines à hélice peuvent avoir des pales

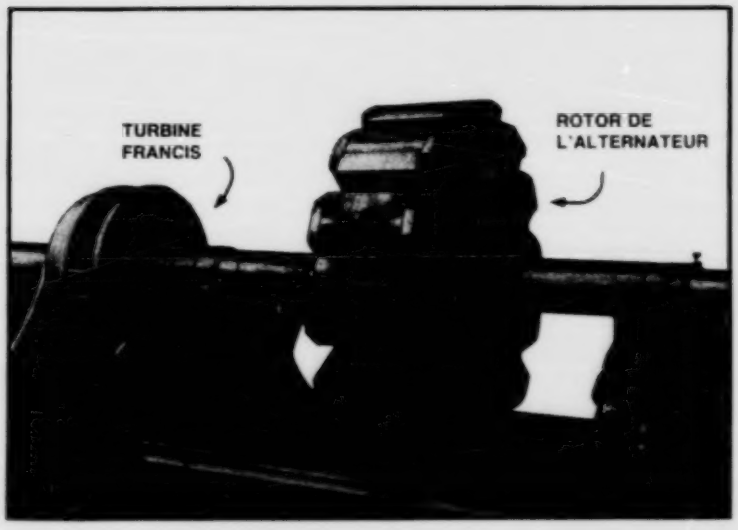


Fig. 12. Il existe trois types principaux de turbines hydrauliques: Francis, Pelton et à hélice. Dans la mesure où la plupart des turbines du type Francis sont construites avec des arbres verticaux, un alternateur à turbine Francis est en général construit avec un arbre vertical.

fixes ou mobiles (type Kaplan). La photo de la **figure 13** représente une installation de génératrices hydrauliques de type Kaplan. Les turbines à réaction et à hélice sont généralement construites avec des arbres verticaux. Les turbines à action, dont la vitesse est plus faible, sont construites avec des arbres horizontaux. Pour les turbines à action ayant une vitesse de rotation plus élevée, on utilise des arbres verticaux.

Fig. 13. Dans cette installation, on peut voir quatre génératrices hydrauliques verticales. Les turbines sont du type à hélice avec pales mobiles (type Kaplan).

34 Caractéristiques des alternateurs à turbine à vapeur

Un alternateur à turbine à vapeur, ou turbogénératrice, fonctionne à très grande vitesse et à des régimes de puissance très élevés. Pour un alternateur bipolaire, la vitesse de rotation maximale de la turbine pour un système électrique de 60 Hz est 3600 tours/minute. Sur les turbogénératrices plus petites, un engrenage placé entre la turbine et l'alternateur permet à la turbine d'atteindre des vitesses de rotation supérieures à 3600 tours/minute; mais lorsque les régimes augmentent, il n'est plus possible d'utiliser des engrenages qui sont remplacés par des commandes directes. À propos des turbines à vapeur, nous ne parlerons que des commandes directes. Les alternateurs è engrenage, qui sont semblables aux alternateurs à moteur, ne sont fabriqués que dans de petites dimensions.

Les turbogénératrices ont des rotors cylindriques. Les enroulements des rotors cylindriques sont logés dans des fentes de noyau magnétique, plutôt que sur des noyaux magnétiques à pôles saillants. Même sur les rotors cylindriques, qui sont mécaniquement plus résistants, le diamètre maximal pour une vitesse déterminée est strictement limité. Pour des régimes élevés, les rotors sont longs par rapport à leur diamètre. Par conséquent, il faut tenir compte tout particulièrement des problèmes de ventilation et de vibration sur les rotors longs.

35 Ventilation des turbogénératrices

Les turbogénératrices n'ont pas d'espace interpolaire (espace entre les pôles) pour laisser passer l'air, et l'espace de l'entrefer est trop petit pour qu'un volume d'air suffisant puisse se déplacer et refroidir l'alternateur. Un système de ventilation radiale est donc prévu pour refroidir le noyau du stator, les bobines et la surface du rotor. L'air se déplace du carter vers le vide, en traversant les canaux de ventilation dans le noyau du stator; il fait ensuite volte-face et se déplace vers l'extérieur sur une autre portion du noyau magnétique, en passant à travers d'autres canaux de ventilation, pour revenir au carter. Le carter est divisé en zones d'air froid et d'air chaud, à partir desquelles l'air de ventilation est fourni et vers lesquelles il retourne. Différentes configurations sont utilisées pour répartir les zones d'air chaud et d'air froid (et pour transporter l'air vers l'entrefer et à partir de l'entrefer), afin de réduire la tendance du système électrique à produire des différences de température dans le noyau.

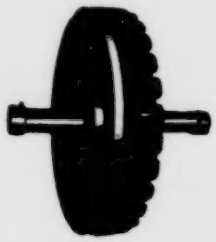
Exercice de contrôle 5

Vous allez maintenant faire une pause pendant quelques minutes et revoir certains points-clés avant de répondre au questionnaire personnel. Comparez vos réponses aux nôtres et révisez, au besoin, les notions qui ne vous sont pas claires.

Vos réponses

1. Citez les trois principaux types d'alternateurs. **1.** _____

2. Le rotor représenté ci-dessous est équipé d'un(e) _____ dont la fonction est d'atténuer les variations de vitesse. **2.** _____



A. obturateur
B. hélice
C. pale fixe
D. bague de charge

3. Si vous deviez assurer l'entretien du moteur primaire d'une petite source de secours alimentant une charge de 4000 kW, vous pourriez supposer qu'il est équipé d'un(e) (turbogénératrice, alternateur à moteur) _____ . **3.** _____

4. Les trois principaux types de turbines hydrauliques sont _____ , _____ et _____ . **4.** _____

5. Les turbogénératrices sont équipées de rotors (à pôles saillants, cylindriques) _____ . **5.** _____

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 5

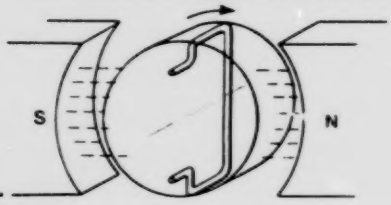
1. à moteur, à turbine hydraulique (génératrice hydraulique) et à turbine à vapeur (turbo-alternateur) Section 32
2. *D* bague de charge Section 32, figure 10
3. alternateur à moteur Section 32
4. À réaction (type Francis), à action (type Pelton) et à débit axial (type à hélice) Section 33
5. cylindriques Section 34

Examen personnel

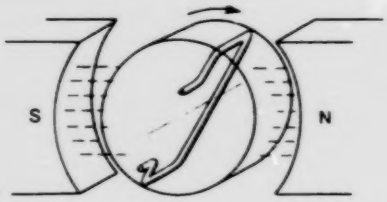
Lisez attentivement chacune des phrases suivantes et assurez-vous que vous en comprenez le sens. Chaque phrase est suivie de quatre mots ou groupes de mots dont un seul est correct. Faites un X sur la lettre correspondant à votre réponse.

1. Parmi les schémas représentés ci-dessous, quel est celui qui montre le point où la boucle coupe le flux minimal?

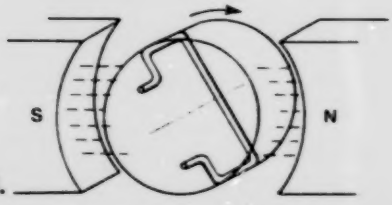
A.



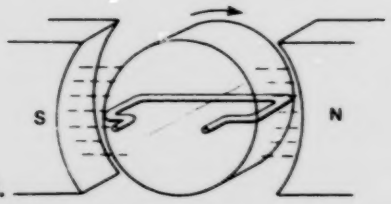
C.



B.



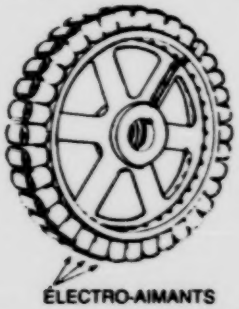
D.



2. La tension aux bornes d'un alternateur est doublée si:

   A. l'intensité du champ magnétique est deux fois moindre.
   B. le nombre de fils sur les bobines est doublé.
   C. la vitesse de l'alternateur est deux fois moindre.
   D. la dimension des fils de la bobine est doublée.

3. Dans le composant de l'alternateur représenté ci-dessous, les électro-aimants reçoivent du courant continu par l'intermédiaire:



   A. d'une bague de charge.
   B. du carter.
   C. d'une turbine à action.
   D. d'une excitatrice.

4. Les enroulements amortisseurs d'un alternateur sont généralement portés par:

   A. l'induit.
   B. le moteur primaire.
   C. le rotor.
   D. le stator.

5. Les caractéristiques électriques nominales d'un alternateur *standard* sont:

   A. 500 kW et 500 V.
   B. 750 kW et 575 V.
   C. 2250 kW et 3000 V
   D. 10 000 kW et 13 800 V.

6. La température maximale de service pour l'isolant de type F est:

   A. 105°C.
   B. 130°C.
   C. 155°C.
   D. 180°C.

7. Un alternateur ne fonctionne pas en parallèle sur les autres. Pour arrêter cet alternateur indépendant, la première étape consiste à:

   A. arrêter le moteur primaire.
   B. réduire la tension de sortie de l'alternateur.
   C. ouvrir tous les interrupteurs des lignes d'alimentation.
   D. ouvrir l'interrupteur de l'inducteur de l'alternateur.

8. Vous voulez vérifier que deux alternateurs fonctionnent bien en parallèle. Des lectures suivantes, quelles sont celles qui doivent être identiques pour chacun des deux alternateurs?

   A. Lectures données par le wattmètre.
   B. Lectures données par le cosinusphimètre.
   C. Lectures de courant.
   D. Lectures de puissance active.

9. Les alternateurs à moteur ont généralement:

   A. des rotors à pôles saillants avec des arbres horizontaux.
   B. des rotors à pôles saillants avec des arbres verticaux.
   C. des rotors cylindriques avec des arbres horizontaux.
   D. des rotors cylindriques avec des arbres verticaux.

10. Les turbines à réaction servent à entraîner:

    A. un alternateur à moteur.
    B. un alternateur à turbine à vapeur.
    C. une turbogénératrice.
    D. une génératrice hydraulique.

Les réponses sont données à la page 332.

Les alternateurs

AF0202

(Lexiques)

Français	Anglais
Alimenter	Energize (to)
Alternateur bipolaire	Two pole alternator
Alternateur indépendant	Single alternator
Amortisseur	Damper
Balai	Brush
Barre omnibus	Bus bar
Bâti	Housing
Blindage	Shield
Bobine mobile	Rotating coil
Bord du rotor	Rotor rim
Boucle de l'induit	Armature coil
Branche	Leg (one phase)
Canalisation	Conduit
Canaux de ventilation	Ventilating duct
Centrale hydro-électrique	Hydroplant
Centrale thermique	Thermal plant
Centrale hydraulique	Hydroplant
Charge	Load
Chemin (magnétique)	Path (magnetic)
Chemin de câbles	Wireway
Circuit hors tension	Dead circuit
Conducteur	Lead
Conduite d'évacuation	Exhaust line
Courant de Foucault	Eddy current
Cuivre dur (trempé)	Hard copper
Culasse ou carter	Frame
Culasse ou carter	Yoke
Décalé	Out of step
Engrenage	Gear
Enroulement à deux couches	Double layer winding
Enroulement à masse polaire	Pole face-winding
Enroulement amortisseur	Damper winding
Enroulement inducteur	Field winding
Enroulement inducteur multiple	Multiple field winding
Entraîné	Rotated
Entrefer	Air gap
Excitatrice	Exciter
Fil guipé (tressé)	Braided wire
Fil plein	Solid wire
Fil torsadé	Stranded wire
Force de coupe	Cutting action
Génératrice hydraulique	Hydrogenerator
Goujon	Stud
Hystérésis	Hysterisis
Inducteur	Field

Anglais	Français
Adjustable blade	Pale mobile
Air gap	Entrefer
Damper winding	Enroulement amortisseur
Armature (= Rotor)	Induit (= Rotor)
Armature coil	Boucle de l'induit
Bracket	Support
Braided wire	Fil guipé (tressé)
Brush	Balai
Bus bar	Barre omnibus
Connected load	Puissance installée
Conduit	Canalisation
Core	Noyau magnétique
Core loss	Perte dans le fer
Core plate = lamination	Tôle magnétique
Crosscurrent	Renvoi de courant
Cutting action	Force de coupe
Cutting speed	Vitesse de coupe
Damper	Amortisseur
Dead circuit	Circuit hors tension
Diamond shaped	En losange
Double-layer winding	Enroulement à deux couches
Dry-disc rectifier	Redresseur à sec
Eddy current	Courant de Foucault
Eddy current loss	Perte par courant de Foucault
Energize (to)	Alimenter
Exciter	Excitatrice
Exciter-alternator	Alternateur-excitatrice
Exhaust line	Conduite d'évacuation
Fan blade	Pale de ventilateur
Feeder	Ligne d'alimentation
Field	Inducteur
Field pole	Pôle inducteur
Field rheostat	Rhéostat de champ
Field winding	Enroulement inducteur
Flywheel	Volant
Fractional HP motor	Moteur de basse puissance
Frame	Carter
Yoke	Culasse
Gear	Engrenage
Hard copper	Cuivre dur (trempé)
Housing	Bâti
Hydrogenerator	Génératrice hydraulique
Hydroplant	Centrale hydro-électrique
Hysterisis	Hystérésis
Impulse turbine	Turbine à action
Iron core	Noyau en fer
Layered (steel)	Stratifié (acier)
Lead	Conducteur

Français	Anglais
Induit	Armature
Induit	Induit
Interrupteur	Switch
Interrupteur ligne de distribution	Main line switch
Lamelle	Strip (Mica)
Ligne d'alimentation	Feeder
Losange (en)	Diamond shaped
Machine à vapeur	Steam engine
Mise en parallèle	Paralleling
Moteur à cage d'écureuil	Squirrel cage motor
Moteur basse puissance	Fractional HP motor
Moteur primaire	Prime mover
Noyau en fer	Iron core
Noyau magnétique	Pole core
Obturateur	Throttle (engine)
Pale de ventilateur	Fan blade
Pale mobile	Adjustable blade
Pertes dans le fer	Core loss
Pertes par courant de Foucault	Eddy current loss
Pertes par ventilation	Windage loss
Plaque de signalisation	Name plate
Pôle inducteur	Field pole
Pôles saillants (à)	Salient-pole rotor
Puissance fournie	Output
Puissance installée	Connected load
Queue de cochon	Pig-tail
Redresseur au sélénium	Selenium rectifier
Redresseur à sec	Dry-disc rectifier
Régulateur de vitesse	Speed control
Régulation de tension	Voltage control
Renvoi de courant	Crosscurrent
khéostat de champ	Field rheostat
Rotation du rotor	Spinning rotor
Rotor	Rotor
Rotor	Inducteur
Shunt	Shunt
Spire	Turn of wire
Stator	Stator
Stratifié (acier)	Layered (steel)
Succession	Pattern
Support	Bracket
Synchronoscope	Synchroscope
Tension de sortie	Voltage output
Tension décalée	Shifted voltage
Tension fournie	Voltage output
Tôle magnétique	Core plate
Tôle magnétique	Lamination
Turbine à action (Pelton)	Impulse turbine
Turbine à hélice	Propeller type (turbine)
Turbine hydraulique	Waterwheel

Anglais	Français
Leg (one phase)	Branche
Main line switch	Interrupteur de la ligne de distribution principale
Multiple field winding	Enroulement inducteur multiple
Name plate	Plaque de signalisation
Out of step	Décalé
Output	Sortie
Output	Puissance fournie
Paralleling	Mise en parallèle
Path (magnetic)	Chemin (magnétique)
Pattern	Forme
Pig-tail	Queue de cochon
Pole core	Noyau magnétique
Pole face-winding	Enroulement à masse polaire
Prime mover	Moteur primaire
Propeller type (turbine)	Turbine à hélice
Rating	Valeur nominale
Rotated	Entraîné
Rotating coil	Bobine mobile
Rotor	Rotor
Rotor	Inducteur
Rotor rim	Bord du rotor
Salient-pole rotor	À pôles saillants
Selenium rectifier	Redresseur au sélénium
Shape	Profil
Shield	Blindage
Shifted voltage	Tension décalée
Shunt	Shunt
Single alternator	Alternateur indépendant
Solid wire	Fil plein
Spinning rotor	Rotation du rotor
Squirrel cage motor	Moteur à cage d'écureuil
Standard rating	Valeur nominale standard
Stationary	Fixe
Stator	Stator
Stator	Induit
Steam engine	Machine à vapeur
Stranded wire	Fil torsadé
Strip	Lamelle
Stud	Goujon
Switch	Interrupteur
Synchroscope	Synchronoscope
Thermal plant	Centrale thermique
Throttle	Obturateur
Turbogenerator	Turbogénératrice
Turn of wire	Spire
Two pole alternator	Alternateur bipolaire
Ventilating duct	Canaux de ventilation
Voltage control	Régulation de tension
Voltage output	Tension fournie ou de sortie
Waterwheel	Turbine hydraulique

Français	Anglais
Turbogénératrice	Turbogenerator
Valeur nominale	Rating
Valeur nominale standard	Standard rating
Vitesse de coupe	Cutting speed
Volant	Flywheel

Anglais	Français
Wattmeter	Wattmètre
Windage loss	Perte par ventilation
Wireway	Chemin de câbles

Transformateurs

AF0203

Transformateurs

Objectifs d'enseignement

Dans l'industrie, on utilise des transformateurs lorsque la tension nominale de l'équipement électrique est différente de la tension fournie par la source. On peut élever ou abaisser la tension grâce aux transformateurs. Parmi les domaines d'application les plus courants, on trouve le transport de l'électricité, les circuits de commande et de signalisation, l'équipement électronique et radioélectrique.

Dans le présent cours, vous étudierez le principe de fonctionnement, la construction élémentaire d'un transformateur, les différents types de transformateurs, ainsi que leurs applications et méthodes d'entretien.

À la fin du cours, vous devriez être en mesure:

- *D'expliquer les principaux composants d'un transformateur.*
- *D'expliquer comment l'inductance mutuelle permet de changer une tension ou un courant alternatif.*
- *De déterminer les rapports de transformation lorsqu'on connaît les tensions ou courants primaires et secondaires.*
- *De calculer la tension ou le courant primaire ou secondaire lorsqu'on connaît l'une de ces deux valeurs ainsi que le rapport de transformation.*
- *D'expliquer pourquoi les noyaux magnétiques des transformateurs sont feuilletés (stratifiés).*
- *De raccorder trois transformateurs monophasés devant fonctionner en triphasé.*
- *De calculer le courant de secteur (le courant de phase étant connu) dans des transformateurs montés en triangle (△).*
- *D'expliquer le principe de fonctionnement d'un autotransformateur.*

Table des matières

Fonctionnement des transformateurs

Définition d'un transformateur 111
Inductance mutuelle 112
Transformateurs abaisseurs et élévateurs 113
Rapport de transformation 114
Rapport des tensions et tension secondaire 115
Conditions de marche dans un circuit secondaire ouvert et fermé 116
Puissance dans le primaire et le secondaire 116
Courant en charge dans le primaire et le secondaire 118
Pertes dans le transformateur 119
Réduction des pertes 120
Régulation des transformateurs 120
Exercice de contrôle 1 121

Transformateurs dans les circuits triphasés

Transformateurs monophasés dans des circuits triphasés 123
Polarité des transformateurs 123
Groupe de transformateurs à branchement Y-Y 124
Groupe de transformateurs à branchement Δ-Δ 125
Groupes de transformateurs à branchement Y-Δ et Δ-Y 125
Transformateurs triphasés 126
Branchement de transformateurs monophasés sur une ligne triphasée 127
Exercice de contrôle 2 128

Types de transformateurs

Construction des transformateurs 129
Transformateurs à noyau et transformateurs cuirassés 130
Transformateurs de puissance 131
Transformateurs de distribution 132
Transformateurs de mesure 132
Transformateur à deux secondaires 133
Autotransformateur 134
Transformateurs pour appareils radio et matériel électronique 135
Transformateurs spéciaux 135
Inductances 136
Bobinages à saturation 137
Amplificateurs magnétiques 138
Isolation des transformateurs 138
Puissance nominale des transformateurs 139
Défauts du transformateur 139
Exercice de contrôle 3 140

Examen personnel 142

Lexiques 144

Fonctionnement des transformateurs

1 Définition d'un transformateur

Un *transformateur* change, ou transforme, une tension alternative donnée en une tension alternative plus haute ou plus basse. Il agit pratiquement comme une pompe qui change la pression de l'eau d'un système de distribution d'eau.

Si vous démontiez un transformateur élémentaire, vous y trouveriez deux bobines séparées enroulées autour d'un noyau magnétique en fer, comme l'indique la figure 1. Ce sont les principaux composants du transformateur. La tension alternative fournie par une source (alternateur ou ligne de transport électrique) est appliquée à une bobine que l'on appelle *enroulement primaire*, ou tout simplement *primaire*. L'autre bobine est appelée *enroulement secondaire*, ou *secondaire*. Le secondaire n'est d'aucune façon connecté au primaire ni à une autre source de tension.

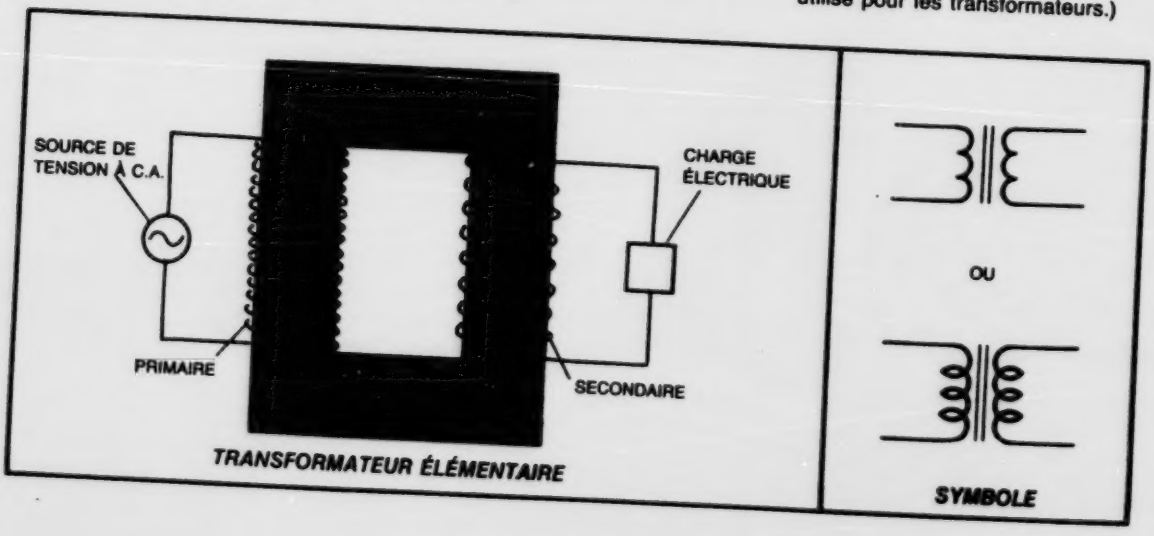


Fig. 1. Dans ce transformateur, l'enroulement primaire a 16 spires et le secondaire, 8 spires. Par conséquent, la tension secondaire sera deux fois moins élevée que la tension primaire. (Le symbole en forme de festons représenté ci-dessous est actuellement le symbole le plus couramment utilisé pour les transformateurs.)

Les deux bobines sont isolées du noyau magnétique. Le secondaire du transformateur est raccordé à une *charge* électrique (lampe ou moteur). Le primaire se trouve dans un circuit fermé et est alimenté par une source de tension à c.a. (courant alternatif); Le secondaire se trouve dans un circuit fermé qui contient la charge électrique. Les deux circuits sont électriquement indépendants.

Lorsqu'une tension est appliquée à l'enroulement primaire, une tension est *induite* dans l'enroulement secondaire et un courant alternatif circule dans la charge. La tension appliquée est également appelée tension *primaire* et la tension induite, tension *secondaire*. La tension induite est due à l'*inductance mutuelle* qui est un effet de l'induction électromagnétique.

2 Inductance mutuelle

Vous avez étudié l'induction électromagnétique dans des cours précédents. Vous savez qu'un mouvement relatif des lignes de force magnétiques et d'un conducteur peut fournir ou produire une tension. Dans une génératrice, un groupe de conducteurs se déplacent dans un champ magnétique et une tension est induite dans ces conducteurs. *Dans un transformateur, les conducteurs ne se déplacent pas*, alors que la tension appliquée varie.

Les lignes de force (flux) magnétique créées par la tension appliquée sont représentées en pointillés dans le noyau magnétique en fer de la figure 1. Le champ magnétique constitué par ces lignes change en cas de variation quelconque de la tension appliquée. Le nombre et la direction des lignes de force changent lorsque celles-ci dépassent les spires du secondaire. Le changement du champ magnétique a le même effet qu'un *mouvement* et se traduit par une *inductance mutuelle*, c'est-à-dire par une tension induite dans le secondaire.

Si le secondaire est raccordé à une charge et qu'un chemin fermé est offert au passage du courant, un courant alternatif circulera dans la charge.

Toute variation du niveau et de la polarité de la tension dans le primaire fait varier les lignes de force et, par conséquent, la tension induite dans le secondaire. Si la tension dans le primaire est alter-

native, elle est également alternative dans le secondaire et a la même fréquence.

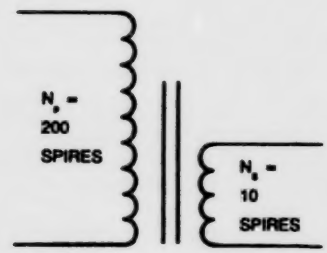
La tension induite dans le secondaire dépend du nombre de spires dans le secondaire et de la nature du matériau dans lequel le noyau magnétique est fabriqué. Si l'enroulement secondaire comporte un plus grand nombre de spires que l'enroulement primaire, la tension secondaire est supérieure à la tension primaire; si l'enroulement secondaire comporte un moins grand nombre de spires que l'enroulement primaire, la tension secondaire est inférieure à la tension primaire.

Le matériau dans lequel est construit le noyau magnétique du transformateur influe également sur l'inductance mutuelle et la tension induite. Par exemple, le champ magnétique et la tension induite seront plus forts dans un transformateur doté d'un noyau magnétique en fer que dans un transformateur dont le noyau est fabriqué dans un matériau non magnétique.

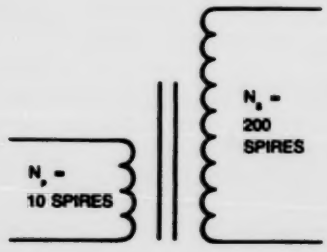
3 Transformateurs abaisseurs et élévateurs

Si un transformateur a un plus grand nombre de spires dans l'enroulement primaire que dans l'enroulement secondaire, la tension primaire est alors supérieure à la tension secondaire. Cela veut dire que cette dernière a été diminuée ou «abaissée». Un transformateur de ce type est appelé **transformateur abaisseur**. Supposons, par exemple, que la tension fournie par la ligne de distribution est de 4600 V (volts) et que les moteurs utilisés dans l'usine ont une tension nominale de 230 V. Un transformateur abaisseur doit dans ce cas être installé entre la ligne de distribution et le moteur pour abaisser la tension de 4600 V à 230 V. Puisque la tension secondaire doit être 20 fois inférieure à la tension primaire, l'enroulement secondaire du transformateur doit comporter 20 fois moins de spires que l'enroulement primaire.

Un transformateur peut également avoir une tension secondaire plus élevée que la tension primaire. Un transformateur de ce type est appelé **transformateur élévateur**. Supposons, par exemple, que la tension fournie par un alternateur est de 2300 V et que les lignes transportent l'énergie électrique à une tension de 230 000 V. Dans ce cas, il faut raccorder un transformateur élévateur entre l'alternateur et la ligne de transport. Le secondaire de ce transformateur élévateur doit comporter 100 fois plus de spires que le primaire.



TRANSFORMATEUR ABAISSEUR



TRANSFORMATEUR ÉLÉVATEUR

4 Rapport de transformation

Il est clair que le changement, ou la transformation, de la tension dépend du rapport des nombres de spires du primaire sur le nombre de spires du secondaire. Le *rapport de transformation* est donc un paramètre très important dans la structure du transformateur. Sachant que le symbole N_p indique le nombre de spires du primaire et le symbole N_s, le nombre de spires du secondaire, le rapport de transformation peut se calculer comme suit:

$$\frac{N_p}{N_s} \text{ ou } N_p : N_s$$

Par exemple, si un transformateur abaisseur a un primaire de 1000 spires et un secondaire de 20 spires, le rapport de transformation est de:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{1000}{10} = \frac{50}{1}, \text{ ou } 50 : 1$$

Cela signifie que la tension primaire du transformateur est 50 fois supérieure à la tension secondaire.

Deuxième exemple: si un transformateur élévateur a un primaire de 10 spires et un secondaire de 400 spires, son rapport de transformation est de:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{10}{400} = \frac{1}{40}, \text{ ou } 1 : 40$$

Dans ce cas, la tension secondaire du transformateur est 40 fois supérieure à la tension primaire.

Dernier exemple: si un transformateur comporte un primaire de 100 spires et un secondaire de 100 spires, son rapport de transformation est de:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{100}{100} = 1, \text{ ou } 1 : 1$$

Dans ce transformateur, la tension primaire est égale à la tension secondaire. Dans ce cas, la tension n'est pas du tout transformée: s'agit-il toujours d'un transformateur? Oui. C'e «transformateur» peut être utilisé pour des applications spéciales, par exemple pour isoler électriquement deux circuits sans changer leur tension.

5 Rapport des tensions et tension secondaire

Le rapport de la tension primaire sur la tension secondaire est égal au rapport de transformation. Sachant que E_p représente la tension primaire et E_s la tension secondaire, le rapport des tensions peut être exprimé par la formule suivante:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

Si l'on connaît le nombre de spires et la tension primaire, on peut calculer la tension secondaire en calculant la valeur de E_s à partir du rapport des tensions:

$$E_s = \frac{N_s}{N_p} \times E_p$$

Par exemple, si l'on applique une tension primaire E_p de 50 V à un transformateur élévateur dont le primaire a 100 spires N_p et le secondaire 1200 spires N_s, la tension secondaire sera de:

$$E_s = \frac{N_s}{N_p} \times E_p = \frac{1200}{100} \times 50 = 600 \text{ V}$$

Sans utiliser la formule, on peut déterminer la tension secondaire par déduction: le rapport de transformation est de 100 : 1200 = 1 : 12. Cela signifie que le secondaire a 12 fois plus de spires que le primaire. Par conséquent, sa tension doit être 12 fois supérieure, soit 12 × 50 = 600 V.

Ou encore: si une tension primaire de 24 V est appliquée à un transformateur abaisseur ayant 200 spires dans le primaire et 50 spires dans le secondaire, la tension secondaire sera de:

$$E_s = \frac{N_s}{N_p} \times E_p = \frac{30}{200} \times 24 = 6 \text{ V}$$

De nouveau, le problème peut être résolu par déduction. Le rapport de transformation est de 200 : 50 = 4 :1, ce qui veut dire que le primaire a 4 fois plus de spires et une tension 4 fois plus élevée que le secondaire. La tension secondaire est donc égale à un quart de la tension primaire, soit $\frac{24}{4}$ = 6 V.

6 Conditions de marche dans un circuit secondaire ouvert et fermé

Les circuits du transformateur sont représentés dans le schéma de la figure 2. Les composants sont représentés par des symboles normalisés. La charge électrique alimentée par le transformateur est une résistance raccordée au circuit secondaire.

Lorsque l'interrupteur du circuit secondaire est ouvert, aucune charge n'est raccordée au transformateur et aucun courant ne circule dans l'enroulement secondaire (bien qu'une tension y soit induite). C'est ce qu'on appelle la condition de *marche à vide* du transformateur. Le primaire est raccordé à une source de courant et un *courant à vide* circule dans le circuit primaire. Le courant à vide primaire est très faible et est appelé courant d'*excitation*.

Lorsque l'interrupteur est fermé, un courant circule dans l'enroulement secondaire et la charge. C'est ce qu'on appelle le courant *secondaire en charge*. Un courant primaire plus élevé commence à circuler dans le primaire et s'ajuste automatiquement au courant en charge du secondaire.

Pour travailler sur des transformateurs, vous devez pouvoir faire la distinction entre les conditions de marche à vide et en charge, car vous devez connaître les niveaux de tension et de courant présents lorsque vous prenez ces mesures.

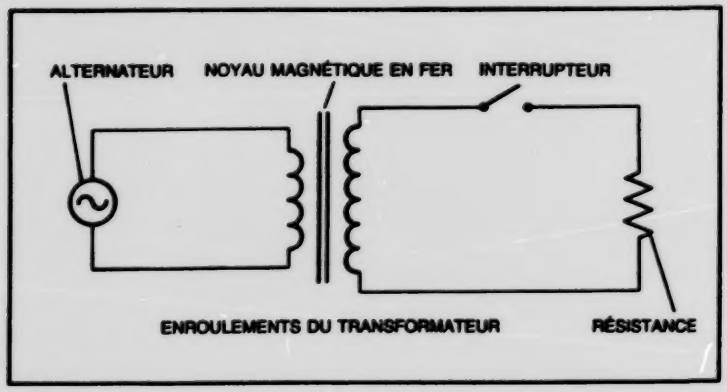


Fig. 2. Dans ce schéma, les composants sont représentés par des symboles; l'onde sinusoïdale entourée d'un cercle est le symbole d'un générateur de c.a. ou alternateur; les deux lignes festonnées représentent les enroulements du transformateur et les deux lignes droites entre les deux lignes festonnées représentent le noyau magnétique en fer. L'interrupteur et la résistance sont également représentés par des symboles normalisés.

7 Puissance dans le primaire et le secondaire

Dans un transformateur idéal ou parfait, c'est-à-dire dans un transformateur où il n'y a aucune perte, qui fonctionne dans des condi-

tions de marche en charge, la puissance dans le circuit primaire est égale à la puissance fournie à la charge par le circuit secondaire. Vous avez appris dans un cours précédent, que la puissance électrique P, en watts, est égale à la tension E, en volts, multipliée par le courant I, en ampères, soit:

$$P = E \times I$$

Dans un transformateur, le produit de la tension primaire E_p et du courant primaire I_p est égal au produit de la tension secondaire E_s et du courant secondaire I_s, et se calcule par la formule élémentaire suivante:

$$P_p = P_s$$

ou

$$E_p \times I_p = E_s \times I_s$$

Le secondaire d'un transformateur ne peut fournir plus de puissance qu'il n'en reçoit du primaire, de la même manière qu'une pompe à eau ne peut pomper plus d'eau qu'elle n'en reçoit. Les transformateurs élévateurs et abaisseurs ont des tensions et des courants différents dans leurs circuits primaires et secondaires, mais la puissance dans chaque circuit est la même. Par conséquent, dans un transformateur élévateur, la tension secondaire est supérieure à la tension primaire et le courant primaire doit être supérieur au courant primaire pour que leur produit reste le même. De même, dans un transformateur abaisseur, la tension secondaire est inférieure à la tension primaire, mais le courant secondaire est supérieur au courant primaire pour que leur produit reste le même.

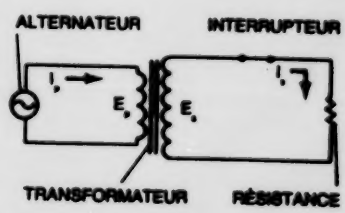
On peut calculer le courant primaire en charge si la tension primaire, le courant et la tension secondaires sont connus (vous vous souvenez que la puissance ne change pas). Le calcul se fait en appliquant la formule suivante:

$$I_p = \frac{E_s}{E_p} \times I_s$$

Par exemple, si la tension primaire est de 14 V, la tension secondaire de 140 V et le courant secondaire de 20 A (ampères), le courant primaire est égal à:

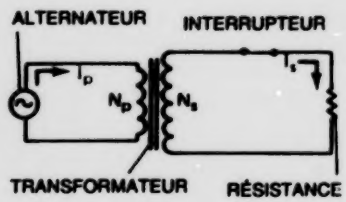
$$I_p = \frac{E_s}{E_p} \times I_s = \frac{140}{14} \times 20 = 200 \text{ A}$$

La tension secondaire est 10 fois plus élevée que la tension primaire et le courant primaire doit être 10 fois plus élevé que le courant secondaire.



Un terme quelconque de l'équation peut être déterminé en appliquant la formule de base, si les trois autres termes de l'équation sont connus.

8 Courant en charge dans le primaire et le secondaire



Si, dans le circuit secondaire d'un transformateur, la charge alimentée est une résistance comme le montre la figure 2, on peut calculer le courant secondaire I_s d'après la loi d'Ohm: le courant secondaire I_s, en ampères, est égal à la tension secondaire E_s en volts, divisé par la résistance de la charge R, en ohms, soit:

$$I_s = \frac{E_s}{\mathrm{R}}$$

Supposons que, dans un transformateur élévateur, le rapport de transformation soit 1 : 2. La tension secondaire est alors deux fois plus élevée que la tension primaire et le courant secondaire doit être égal à la moitié du courant primaire.

Les courants en charge peuvent également être déterminés lorsque la tension est inconnue, à condition que le rapport de transformation soit connu. Le champ magnétique créé dans le noyau du transformateur est le même dans le primaire et dans le secondaire du transformateur. Vous avez appris dans un cours précédent que la puissance du champ magnétique, ou force magnétomotrice, se mesure en *ampères-tours*. Si l'on multiplie le nombre de spires du primaire N_p par le courant primaire I_p, le produit $N_p \times I_p$ est la force magnétomotrice (en ampères-tours) produite dans le transformateur. Puisque le champ magnétique reste le même dans tout le transformateur, **le produit du nombre de spires dans le secondaire N_s et du courant secondaire I_s doit être égal au produit $N_p I_p$**, soit:

$$N_p I_p = N_s I_s$$

Le courant primaire peut alors être déterminé par la formule suivante:

$$I_p = \frac{N_s}{N_p} \times I_s$$

Par exemple, si un enroulement primaire a 100 spires et l'enroule-

ment secondaire 200 spires, et si le courant secondaire est de 2 A (valeur déterminée par la résistance de la charge), le courant primaire sera égal à:

$$I_p = \frac{N_s}{N_p} \times I_s = \frac{200}{100} \times 2 = 4 \text{ A}$$

9 Pertes dans le transformateur

Bien sûr, le transformateur idéal n'existe pas. S'il existait, il n'y aurait pas de perte. Cependant, le transformateur type utilisé dans la pratique a un rendement qui se rapproche de l'idéal, même s'il n'est pas parfait à 100%.

Voici les principales raisons pour lesquelles les transformateurs ne sont pas parfaits:

1. La résistance des enroulements n'est jamais nulle. Par conséquent, il y a une perte de puissance due à la résistance (I^2R).
2. Les lignes de force déterminées par le courant dans les enroulements doivent toutes traverser le noyau magnétique en fer; cependant, certaines d'entre elles suivent d'autres chemins dans l'air, ce qui produit un phénomène appelé fuite magnétique.
3. La plupart des matériaux magnétiques ne se démagnétisent pas immédiatement lorsque la force magnétisante a disparu, ce qui entraîne des pertes par hystérésis.
4. Le matériau magnétique est aussi un conducteur d'électricité et peut former un circuit fermé avec des courants en circulation, appelés **courants de Foucault**, présents dans le circuit.

On retranche la somme de toutes les pertes de la *puissance d'entrée* pour obtenir la *puissance de sortie*.

On peut alors calculer le rendement d'un transformateur en utilisant la même formule que pour d'autres machines:

$$\textbf{Rendement} = \frac{\textbf{Puissance de sortie}}{\textbf{Puissance d'entrée}} \times 100$$

Par exemple, lorsque la puissance d'entrée d'un transformateur est de 220 VA (volts-ampères) et sa puissance de sortie est de 210 VA, son rendement est de:

$$\frac{210}{220} \times 100 = 95\%$$

10 Réduction des pertes

Dans un transformateur de haute qualité, les pertes sont négligeables. Par exemple, le fil utilisé pour les enroulements des bobines est suffisamment gros pour réduire au minimum les pertes par effet Joule (I^2R); la réluctance du noyau magnétique en fer est très faible, si bien que les fuites magnétiques sont négligeables. L'utilisation de certains alliages permet également de réduire les pertes par hystérésis. Enfin, la construction du noyau magnétique en minces feuilles de fer, appelées *tôles magnétiques*, au lieu d'un noyau magnétique solide, permet de réduire les pertes dues aux courants de Foucault. Tous ces facteurs sont pris en considération dans la conception des transformateurs industriels.

11 Régulation des transformateurs

La résistance et les autres pertes dans un transformateur abaissent la tension secondaire, si bien que la valeur de la tension secondaire en charge est différente de sa valeur à vide. Lorsqu'aucune charge n'est raccordée au secondaire, le rapport de la tension primaire sur la tension secondaire est pratiquement égal au rapport de transformation. Cependant, lorsqu'une charge est raccordée au secondaire et qu'un courant important circule dans le circuit secondaire, il se produit généralement une baisse de la tension secondaire. La variation de la tension secondaire résultant du raccordement d'une charge au transformateur est appelée la *régulation* du transformateur. (La régulation peut également être exprimée comme un pourcentage de la tension secondaire à pleine charge.)

Exercice de contrôle 1

Vous allez maintenant faire une petite pause pour vérifier si vous comprenez bien les principes de base du fonctionnement d'un transformateur. Lorsque vous aurez fini de répondre aux questions, vérifiez si vos réponses correspondent bien aux nôtres et révisez, au besoin, les sections citées en référence.

Vos réponses

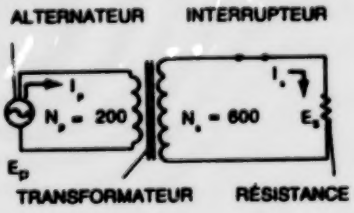
1. L'appareil capable de faire passer une tension alternative d'une valeur à une autre est appelé _____ . — 1. _____

2. Une variation de tension dans une bobine qui induit une tension dans une autre bobine placée à proximité est le résultat d'une inductance (propre, mutuelle) _____ . — 2. _____

3. Si l'enroulement secondaire a cinq fois plus de spires que l'enroulement primaire, la tension secondaire est égale à: — 3. _____
   A. un cinquième de la tension primaire;
   B. la tension primaire;
   C. cinq fois la tension primaire;
   D. vingt-cinq fois la tension primaire.

4. Si l'enroulement primaire d'un transformateur a plus de spires que l'enroulement secondaire, il s'agit d'un transformateur (abaisseur, élévateur) _____ . Si le secondaire a plus de spires, il s'agit d'un transformateur (abaisseur, élévateur) _____ . — 4. _____ _____

5. Dans le transformateur représenté ci-dessous, trouvez la tension secondaire E_s, sachant que la tension primaire est de 12 V. — 5. _____



6. Le courant qui circule dans le primaire du transformateur sans qu'aucune charge ne soit raccordée au secondaire est appelé courant _____ . — 6. _____

7. Quelle est l'intensité du courant primaire dans le transformateur représenté sur la figure de la question 5 lorsque le courant de charge secondaire est de 4 A? — 7. I_p = _____

Voir les réponses à la page suivante.

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 1

1. transformateur — Section 1
2. mutuelle — Section 2
3. *C* cinq fois la tension primaire — Section 3
4. abaisseur élévateur — Section 3
5. 36 V — Section 5

$$E_s = \frac{N_s}{N_p} \times E_p$$

$$= \frac{600}{200} \times 12$$

$$= 3 \times 12$$

$$= 36 \text{ V}$$

6. d'excitation — Section 6
7. 12 A — Section 8

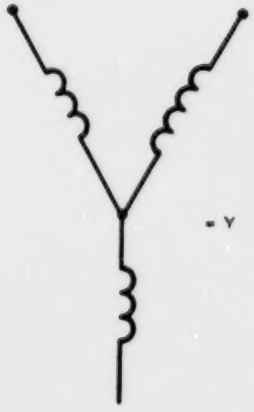
$$I_p = \frac{N_s}{N_p} \times I_s = \frac{600}{200} \times 4$$

$$= 3 \times 4 = 12 \text{ A}$$

Transformateurs dans les circuits triphasés

12 Transformateurs monophasés dans des circuits triphasés

La plupart des transformateurs en service aujourd'hui sont soit monophasés, soit triphasés. Lorsqu'un transformateur transforme une tension monophasée en une autre tension, il s'agit d'un *transformateur monophasé*. Cependant, les systèmes actuels de production et de distribution de l'énergie sont principalement équipés de circuits triphasés. Pour transformer une tension triphasée, on peut utiliser soit un groupe de trois transformateurs monophasés convenablement branchés, soit un transformateur triphasé. Lorsque les transformateurs monophasés sont groupés en batterie, ils doivent avoir les mêmes valeurs nominales et la même polarité aux bornes. Dans un groupe de transformateurs triphasés, les quatre branchements standard sont les suivants: Y-Y (étoile-étoile), Δ-Δ (triangle-triangle), Y-Δ (étoile-triangle) et Δ-Y (triangle-étoile). (Le symbole Δ correspondant à la lettre grecque delta).



MONTAGE EN ÉTOILE

MONTAGE EN TRIANGLE

13 Polarité des transformateurs

Losqu'on doit brancher des transformateurs monophasés en parallèle ou selon une configuration triphasée, il faut connaître la *polarité* aux bornes pour effectuer correctement les raccordements. Le terme «polarité» fait simplement référence au sens relatif de la tension entre les bornes haute tension et les bornes basse tension.

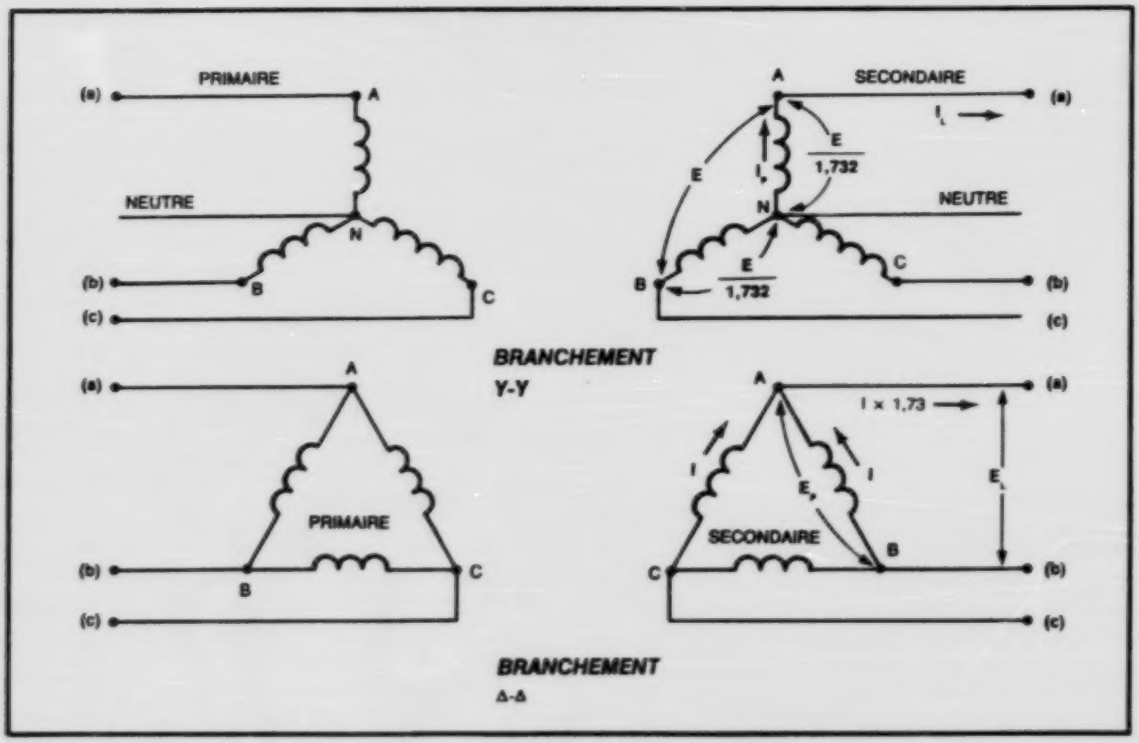
La polarité peut être *additive* ou *soustractive*, selon la façon dont les conducteurs des enroulements sont raccordés aux bornes du transformateur. Cela veut dire que les tensions s'additionnent si elles ont toutes deux la même polarité et se soustraient si elles ont des polarités opposées.

Pour que des transformateurs fonctionnent correctement en parallèle, il faut que leur rapport de transformation soit pratiquement égal et que la chute de tension dans chaque transformateur ait sensiblement la même valeur.

Fig. 3. Sur les symboles schématiques représentant les transformateurs triphasés, on suppose que chaque transformateur est équipé d'un noyau magnétique en fer, bien que les deux droites représentant le fer ne soient pas tracées. Dans le branchement Y-Y, le courant de phase est égal au courant de ligne. Dans le montage Δ-Δ, la tension de phase est égale à la tension de ligne.

14 Groupe de transformateurs à branchement Y-Y

Dans un groupe de transformateurs à branchement Y-Y, les enroulements primaire et secondaire sont l'un et l'autre montés en étoile. La figure 3 représente un groupe de transformateurs à branchement Y-Y. Les enroulements primaires et secondaires des trois transformateurs sont représentés séparément, bien que, naturellement, chaque transformateur ait son propre enroulement primaire et secondaire.



Trois bornes primaires sont raccordées pour former le neutre primaire *N*. On obtient le neutre secondaire en reliant trois bornes des enroulements secondaires du transformateur. Si la tension secondaire entre deux des trois lignes *A*, *B* ou *C* est *E*, la tension entre une

phase quelconque (*A*, *B* ou *C*) et le neutre *N* est égale à $\frac{E}{1,73}$ ou $E \times 0,58$. Le courant dans l'une quelconque des trois lignes est égal au courant dans une phase quelconque. On trouve la même relation pour les enroulements primaires du groupe de transformateurs.

Par exemple, si la tension secondaire ligne à ligne d'un groupe de transformateurs triphasés à branchement Y-Y est égale à 208 V, la tension phase-neutre sera égale à:

$$\frac{E}{1,73} = \frac{208}{1,73} = 120 \text{ V}$$

15 Groupe de transformateurs à branchement Δ-Δ

La figure 3 représente également un groupe de transformateurs à branchement Δ-Δ. Les enroulements primaires et secondaires sont montés en Δ. Les trois transformateurs monophasés sont branchés de façon à disposer de trois conducteurs ou lignes primaires et de trois lignes secondaires. Cela signifie que la tension entre deux lignes quelconques est égale à celle de l'une des phases du transformateur. En bref, la tension de ligne est égale à la tension de phase. Le courant dans l'une quelconque des trois lignes primaires ou secondaires est égal à 1,73 fois le courant dans une phase quelconque. Ce rapport est vrai pour les enroulements primaires comme pour les enroulements secondaires.

Par exemple, si chacun des trois transformateurs monophasés à branchement Δ-Δ a un courant de phase secondaire de 100 A, le courant de ligne est égal à:

$$1,73 \times 100 = 173 \text{ A}$$

16 Groupes de transformateurs à branchement Y-Δ et Δ-Y

Un groupe triphasé constitué de trois transformateurs monophasés à branchement Y-Δ a un enroulement primaire monté en Y et un enroulement secondaire monté en Δ. Un groupe de transformateurs triphasés branchés en Δ-Y a un enroulement primaire monté en Δ

et un enroulement secondaire monté en Y. Ces deux types de configurations sont représentées sur la figure 4. Le branchement Δ-Y est utilisé pour élever les tensions et le branchement Y-Δ pour les abaisser.

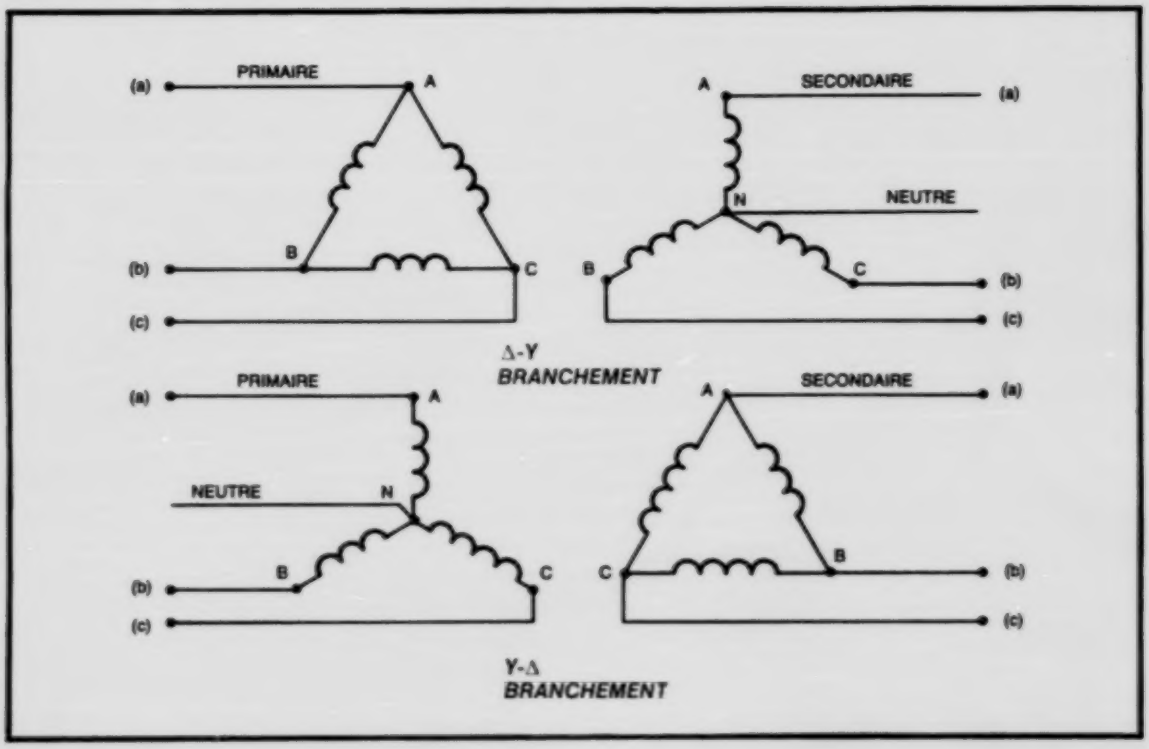


Fig. 4. Les branchements Δ-Y (triangle-étoile) et Y-Δ (étoile-triangle) sont semblables, si ce n'est que les primaires et les secondaires échangent leur fonction.

17 Transformateurs triphasés

Au lieu de trois transformateurs monophasés, on peut utiliser un transformateur triphasé. On peut placer les enroulements de trois phases sur les différentes jambes d'un noyau magnétique unique, comme le montre la figure 5. Les enroulements primaires sont montés en Y, alors que les enroulements secondaires sont montés en Δ. Il s'agit donc, dans ce cas, d'un transformateur à branchement Y-Δ. Un transformateur triphasé peut également être à montage Δ-Y, Y-Y ou Δ-Δ. Dans le transformateur représenté sur la figure 5, une extrémité de chaque enroulement primaire forme les bornes H_1, H_2 et H_3,

tandis que les trois autres extrémités des enroulements primaires sont reliées au point neutre *N*.

Le choix entre transformateurs monophasés et triphasés dépend généralement du coût initial de transport et d'installation, ainsi que de l'encombrement et des pertes de rendement. **Un transformateur triphasé est plus petit et moins encombrant que trois transformateurs monophasés.**

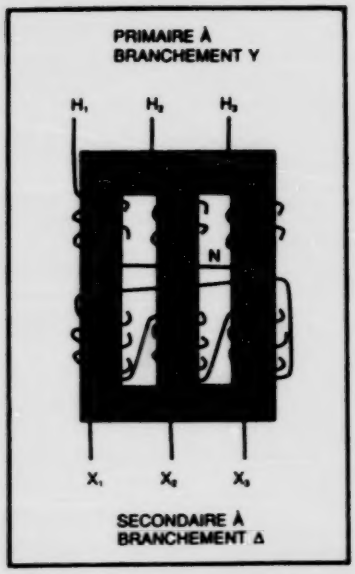


Fig. 5. Ce transformateur triphasé à branchement Y-Δ peut être utilisé comme transformateur à branchement Δ-Y, en reliant la partie Δ à la tension d'entrée et la partie Y à la charge.

18 Branchement de transformateurs monophasés sur une ligne triphasée

Un grand nombre d'applications électriques faisant appel à des transformateurs nécessitent des branchements spéciaux d'un ou de plusieurs transformateurs, monophasés ou triphasés. Parmi ces raccordements, fréquemment utilisés en cas d'urgence, on trouve le branchement de transformateurs monophasés sur un système électrique triphasé.

Si un transformateur monophasé est endommagé dans un groupe de transformateurs à couplage Δ-Δ, le système électrique peut continuer de fonctionner si l'on réalise un branchement sur une ligne triphasée. Il suffit d'enlever le transformateur hors service. Le primaire continue de recevoir une tension triphasée à partir du secondaire. Néanmoins, le branchement de transformateurs monophasés sur un système électrique triphasé ne peut assurer qu'un rendement de 58% par rapport à la puissance initiale fournie du branchement Δ-Δ.

TRIANGLE

BRANCHEMENT SUR UNE LIGNE TRIPHASÉE

Exercice de contrôle 2

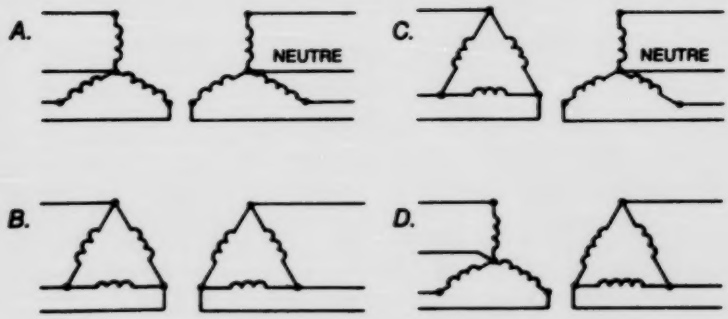
Voici quelques questions qui vous aideront à contrôler vos connaissances sur les transformateurs triphasés. Si l'une de vos réponses est fausse, révisez la section citée en référence avant de continuer.

Vos réponses

1. Pour une application électrique triphasée, on peut utiliser, soit trois transformateurs _____ convenablement couplés, soit un transformateur triphasé. — 1. _____

2. Si dans un groupe de transformateurs triphasés montés en Δ-Δ, chaque courant de phase mesure 200 A, chaque courant de ligne mesure _____ A. — 2. _____

3. Parmi les différentes configurations représentées ci-dessous, quelle est celle qui correspond à un branchement étoile-triangle? — 3. _____



4. Si un transformateur monophasé d'un groupe monté en Δ-Δ est endommagé, vous pouvez en assurer le fonctionnement en effectuant un branchement _____. — 4. _____

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 2

1. monophasés — Section 12
2. 346 A — Section 15
3. D — Section 16
4. sur une ligne
1,73 × 200 A = 346 A — triphasée — Section 18

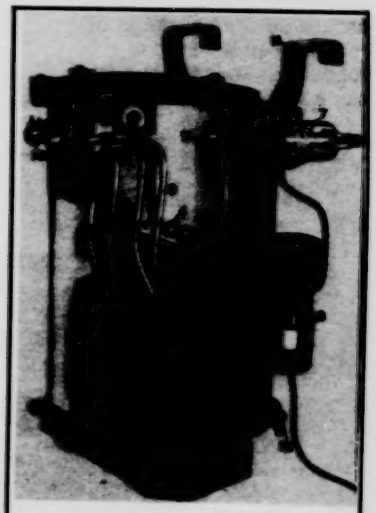
Types de transformateurs

19 Construction des transformateurs

Un transformateur, quel que soit son type ou sa forme, est de construction relativement simple. Il se compose d'un noyau magnétique en fer, d'enroulements primaires et secondaires, d'un isolant, de renforcements mécaniques (ou autres dispositifs permettant de maintenir les différents constituants en place), d'un réfrigérant, d'une enceinte et de traversées.

Le noyau magnétique en fer du transformateur sert à créer un champ magnétique assez intense pour produire la tension nominale dans les enroulements avec un minimum de courant d'excitation. Le noyau magnétique concentre sans son propre volume un plus grand nombre de lignes de force que le même volume d'air ou que tout autre matériau non magnétique.

Les noyaux sont toujours feuilletés, ce qui signifie qu'ils sont fabriqués dans des tôles d'acier appelées tôles magnétiques. Les tôles magnétiques du noyau entraînent une augmentation du coût des transformateurs, mais elles permettent de réduire les courants de Foucault (qui sont induits dans les pièces en fer du transformateur). Les tôles magnétiques sont généralement de forme rectangulaire mais, sur des petits transformateurs, elles peuvent être en forme de L ou de E.



1) Enceinte
2) Noyau magnétique
3) Enroulements
4) Plaquette de connexions
5) Conducteurs haute tension
6) Traversées haute tension
7) Borne de traversée
8) Parafoudre
9) Conducteurs basse tension
10) Traversées jumelées basse tension
11) Supports
12) Borne de mise à la terre

TRANSFORMATEUR DE DISTRIBUTION

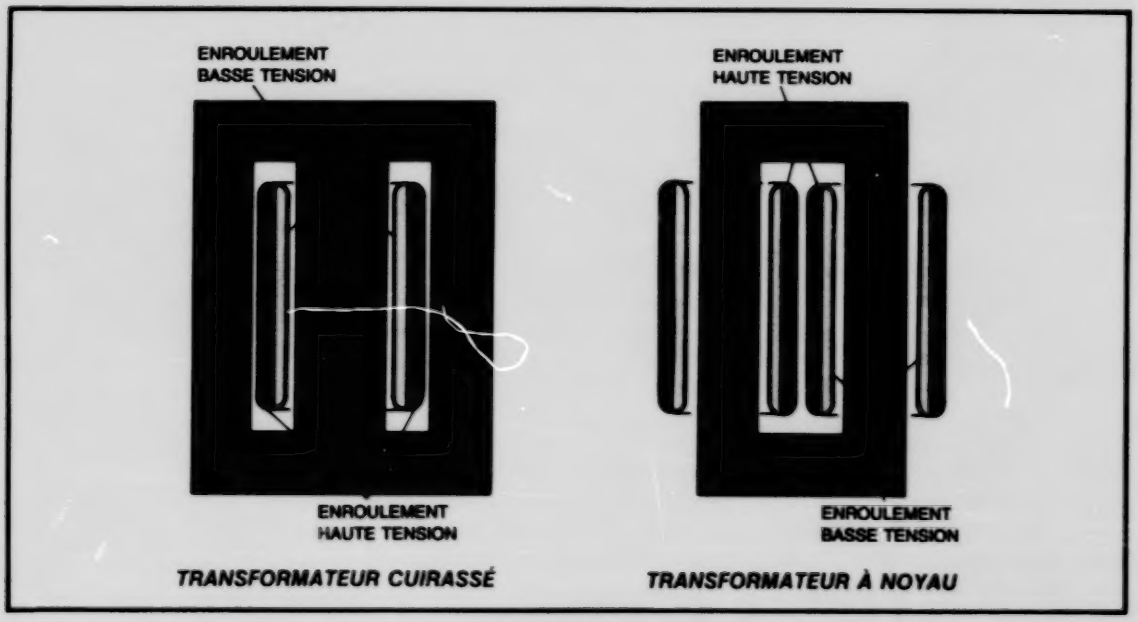
20 Transformateurs à noyau et transformateurs cuirassés

Selon la forme et la construction du noyau magnétique, on trouve des transformateurs *à noyau* et des transformateurs *cuirassés*. Les transformateurs peuvent être construits indifféremment selon l'un ou l'autre de ces deux types, mais, en fonction de l'application, un type de transformateur est souvent plus facile à utiliser et moins coûteux que l'autre.

Dans le transformateur à noyau, le noyau magnétique en fer est entouré par les enroulements. Dans le transformateur cuirassé, les enroulements sont contenus dans une armature (ou cuirasse) en fer.

La **figure 6** représente un transformateur à *noyau* monophasé. Il est muni de deux jambes de noyau magnétique et chaque jambe protège une partie de l'enroulement basse tension et une partie de l'enroulement haute tension sur la partie extérieure. La culasse en fer constitue un circuit fermé pour le passage du flux. (Un transformateur monophasé peut également être construit avec une seule jambe qui supporte l'ensemble des enroulements basse et haute tension.)

Fig. 6. Dans un transformateur, l'enroulement basse tension est généralement placé près du noyau magnétique tandis que l'enroulement haute tension en est éloigné. Cela réduit les risques de court-circuit et de coupure de l'isolant du conducteur sous l'effet d'une haute tension.

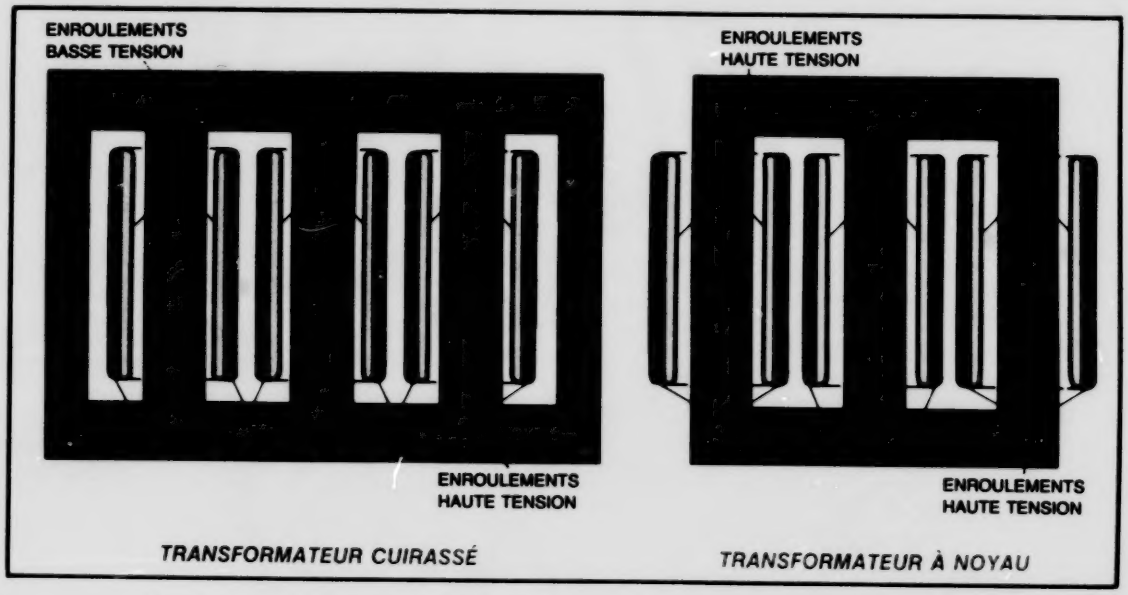


Dans le transformateur *cuirassé* monophasé également représenté sur la figure 6, les deux enroulements sont bobinés sur la jambe centrale. Les deux jambes latérales et la culasse constituent une cuirasse ou un circuit de retour pour le passage du flux.

Un transformateur triphasé à *noyau*, comme celui représenté sur la **figure 7**, a trois jambes de noyau magnétique, chacune conte-

nant une phase de l'enroulement basse tension et une phase de l'enroulement haute tension. Le transformateur triphasé cuirassé représenté sur la figure 7 a cinq jambes de noyau magnétique. L'ensemble des enroulements basse et haute tension se trouvent répartis sur chacune des trois jambes internes; les deux jambes ne contiennent aucun enroulement.

Fig. 7. Chacun des transformateurs triphasés représentés ici a trois paires d'enroulements primaires et trois paires d'enroulements secondaires.



21 Transformateurs de puissance

Les transformateurs utilisés dans l'industrie pour l'alimentation électrique incluent les transformateurs de puissance, de distribution et de mesure.

Les *transformateurs de puissance* sont de gros transformateurs généralement utilisés dans des centrales pour élever la tension dans les systèmes de transmission, et dans les postes, pour abaisser la tension dans les systèmes de distribution. La **figure 8** représente un transformateur de puissance triphasé. D'après l'usage courant, tout transformateur ayant une puissance nominale supérieure à 500 kVA (kilovoltampères) est appelé transformateur de puissance. La haute tension nominale peut être de n'importe quelle valeur, la valeur maximale étant la plus haute tension utilisée dans les lignes de transport. La basse tension nominale est généralement comprise entre 2400 V et 345 000 V, mais les haute et basse tensions nominales peuvent avoir n'importe quelle valeur.

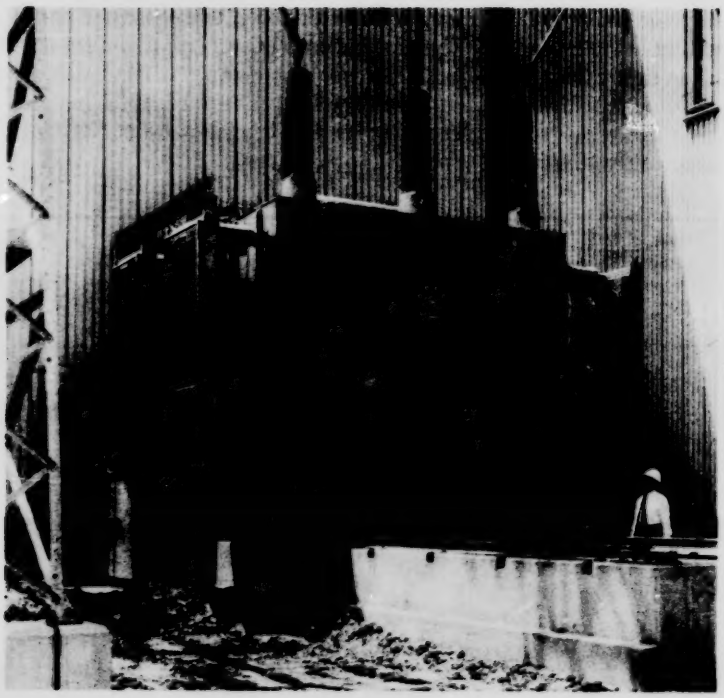


Fig. 8. Les transformateurs de cette taille sont rarement installés à l'intérieur d'un bâtiment. Sur ce transformateur, la plupart des équipements servent au refroidissement des bobines.

Courtoisie de Allis-Chalmers

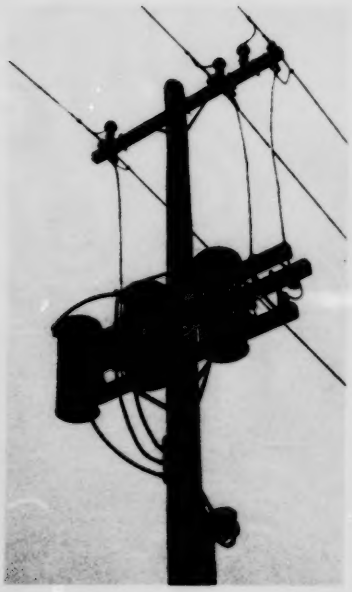


Fig. 9. Les groupes de transformateurs de distribution comme ceux de la figure sont couramment utilisés dans les applications commerciales et industrielles.

22 Transformateurs de distribution

Les *transformateurs de distribution* sont essentiellement utilisés pour abaisser la tension de distribution à la tension de charge, à savoir 2400 V, 600 V ou 480 V pour les abonnés industriels, et 240 V et 120 V pour les abonnés résidentiels et les abonnés commerciaux. D'après l'usage courant, ces transformateurs sont conçus pour une puissance nominale pouvant aller jusqu'à 500 kVA, une haute tension maximale de 67 000 V et une basse tension maximale de 15 000 V. La photo de la **figure 9** représente un groupe de trois transformateurs de distribution montés sur un poteau.

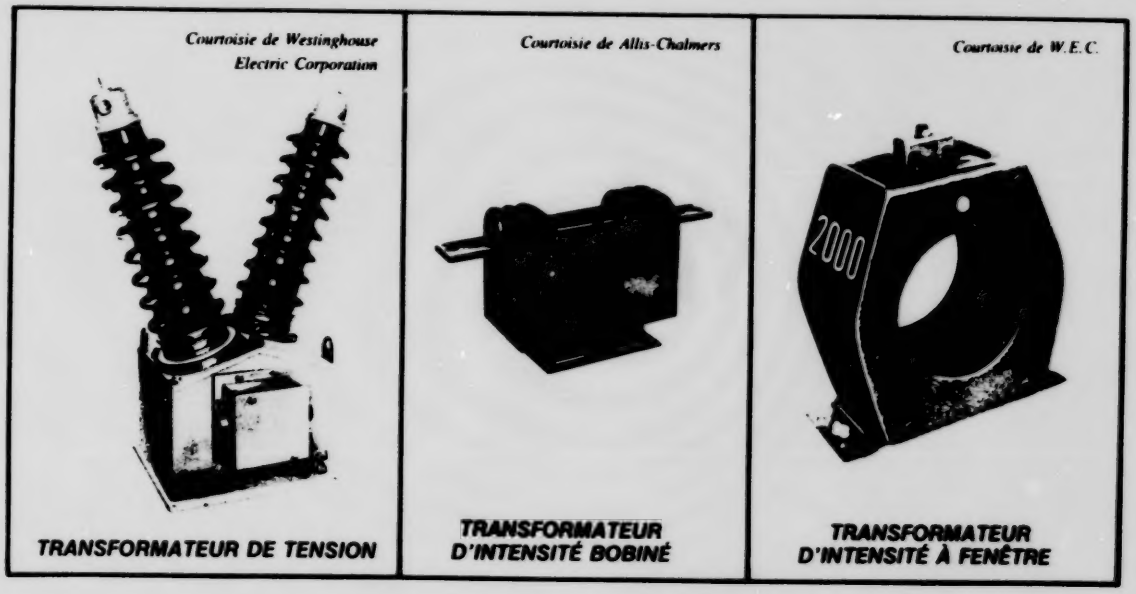
23 Transformateurs de mesure

Les *transformateurs* de mesure sont soit des transformateurs de tension, soit des transformateurs d'intensité. Les *transformateurs de tension* sont de petits transformateurs ayant une puissance nominale de 200 VA ou de 500 VA et ils sont conçus pour transformer

la haute tension de transmission ou de distribution en basse tension, généralement 120 V ou 115 V. Ces transformateurs permettent d'utiliser des appareils de mesure basse tension, tels que compteurs et relais.

Les *transformateurs d'intensité* sont de petits transformateurs ayant une puissance nominale comprise entre 50 et 200 VA environ et une faible intensité (généralement de 5 A) côté secondaire. Ce courant alimente des appareils de mesure et des relais. La **figure 10** représente deux transformateurs d'intensité et un transformateur de tension.

Fig. 10. Le transformateur de tension et les deux transformateurs d'intensité représentés ici sont des exemples de transformateurs de mesure. Le chiffre inscrit sur un des transformateurs d'intensité représente le courant primaire à pleine charge requis pour une sortie de 5 A.



24 Transformateur à deux secondaires

Un transformateur peut être spécialement conçu pour une application spécifique. Le principe de fonctionnement est le même pour tous les transformateurs, mais la forme, le couplage et les dispositifs auxiliaires diffèrent considérablement d'un transformateur à l'autre.

Le transformateur monophasé à deux secondaires, comme celui représenté sur la **figure 11**, est un type courant de transformateur.

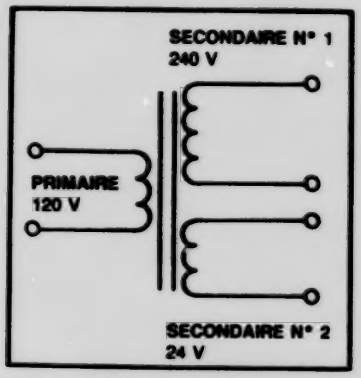


Fig. 11. Ce transformateur a deux secondaires. En théorie, un transformateur peut avoir un nombre illimité d'enroulements. Le rapport de transformation du secondaire 1 est 1 : 2 et celui du secondaire 2, 5 : 1.

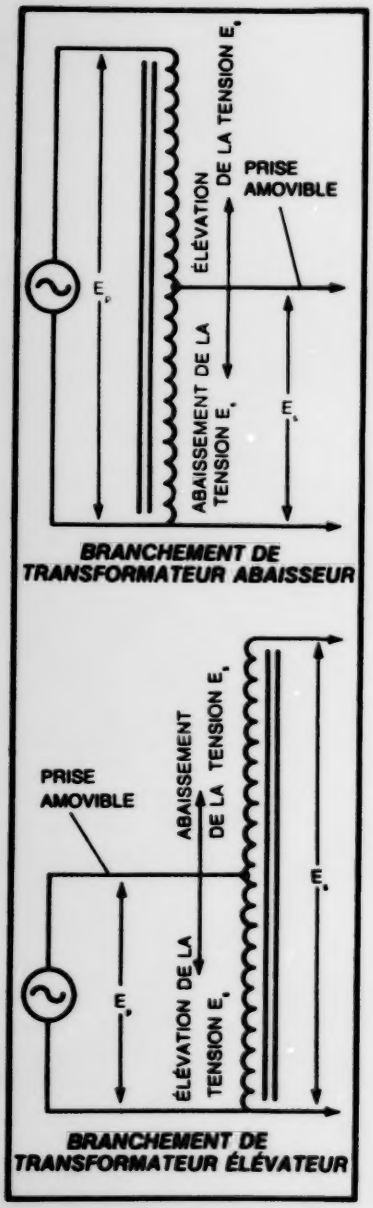


Fig. 12. Les autotransformateurs destinés aux applications électriques ont un noyau magnétique en fer, bien que le symbole utilisé pour l'autotransformateur ne l'indique pas. Ce transformateur élévateur peut être converti en transformateur abaisseur en interchangeant E_p et E_s.

La tension primaire est de 120 V et les tensions secondaires de 240 V et 24 V respectivement. En pratique, le nombre de secondaires est généralement de 2 à 4 au maximum, sauf pour certaines applications électroniques.

25 Autotransformateur

Le transformateur courant a deux enroulements qui ne sont pas directement couplés l'un sur l'autre. Dans un *autotransformateur*, l'un des enroulements est raccordé en série avec l'autre, comme le montre la **figure 12** (il s'agit d'un transformateur élévateur).

La tension primaire E_p est appliquée à l'enroulement primaire ou commun. L'enroulement secondaire ou série est raccordé en série avec le primaire au niveau du point de jonction ou borne. Ce point de jonction peut être fourni par une *prise*, qui divise l'enroulement en deux pour former le primaire et le secondaire de l'autotransformateur.

La tension induite dans l'enroulement secondaire vient s'ajouter à la tension de l'enroulement primaire, et la tension secondaire E_s est supérieure à la tension appliquée. Le rapport de transformation dépend du rapport des nombres de spires comme dans un transformateur à deux enroulements.

L'autotransformateur représenté sur la figure 12 peut être utilisé comme un autotransformateur abaisseur lorsqu'on applique une tension primaire aux bornes de la partie de droite.

Les autotransformateurs sont moins coûteux que les transformateurs classiques à deux enroulements et offrent une meilleure régulation de la tension et un rendement plus élevé. Ils sont utilisés pour le démarrage des moteurs, de sorte qu'une tension inférieure à la tension de secteur peut être appliquée pendant le démarrage. Les autotransformateurs représentent également une solution économique sur les lignes électriques haute tension où les tensions primaires et secondaires sont sensiblement les mêmes. Pour les applications à faible puissance, on peut utiliser des *autotransformateurs variables* sur lesquels la prise est constituée d'un contact coulissant.

Dans l'autotransformateur variable représenté sur la **figure 13**, le balai amovible tourne sous l'action d'un bouton. Des trous sont prévus pour le montage du transformateur sur panneau.

Il existe également des autotransformateurs où la variation de

tension de charge peut être interrompue. Dans ce cas, on peut sélectionner une gamme limitée de tensions à l'aide d'un sélecteur.

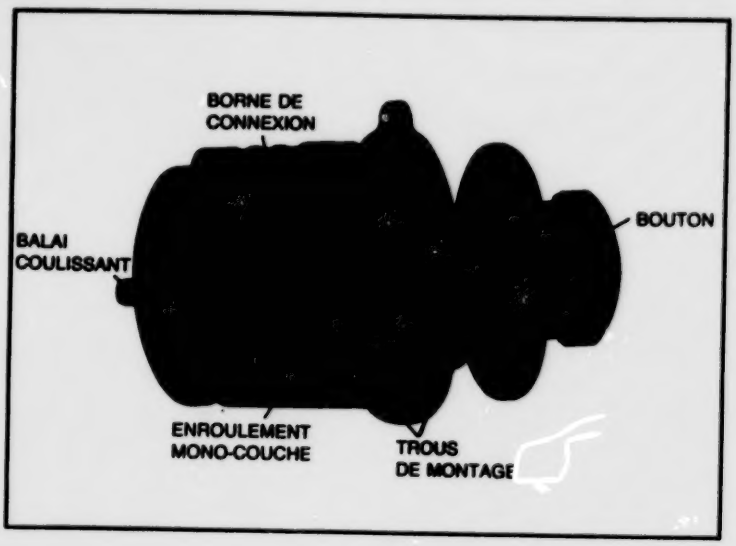


Fig. 13. L'autotransformateur nécessite un entretien périodique: le contact coulissant constitué d'un balai en carbone doit être remplacé à l'occasion. De plus, les enroulements sur lesquels glisse le balai doivent être gardés propres et lisses.

26 Transformateurs pour appareils radio et matériel électronique

La plupart des transformateurs industriels dont vous aurez à assurer l'entretien fonctionnent à une fréquence de 60 Hz (hertz). Cependant, on trouve également des transformateurs pour récepteurs radio et matériel électronique conçus pour fonctionner à des fréquences audio, intermédiaires ou radio. Ces transformateurs sont très petits et de conception spéciale; il s'agit, entre autres, de transformateurs de puissance électroniques à enroulement primaire unique et plusieurs enroulements secondaires, de transformateurs à impulsions, etc.

27 Transformateurs spéciaux

Les transformateurs spéciaux constituent une grande partie des transformateurs utilisés pour changer la tension de secteur en une tension donnée en fonction de la charge à desservir. La tension primaire est

généralement de 600 V ou moins. Dans la famille des transformateurs spéciaux, on trouve notamment les transformateurs de panneaux lumineux qui abaissent la tension de 120 V à 25 V pour alimenter les lampes basse tension en tungstène, les autotransformateurs pour lampes à arc qui abaissent la tension de 240 V à la tension requise pour qu'il y ait production d'arc et les transformateurs qui abaissent la tension de 240 V à 120 V pour l'alimentation des outils portatifs, des ventilateurs, des machines à souder et autres appareils. On peut également inclure dans cette famille les transformateurs de panneaux lumineux au néon qui élèvent la tension de 120 V à 2 000 et 15 000 V. Un grand nombre de transformateurs abaisseurs spéciaux sont utilisés pour des applications mineures telles que les sonnettes, les jouets électriques, les redresseurs de chargeurs de batteries et les lampes individuelles basse tension.

28 Inductances

Une *inductance* est une bobine ou un enroulement monté sur un noyau magnétique. Les inductances sont également appelées *bobines d'arrêt* et *inducteurs*. Les inductances sont utilisées dans les circuits à c.a. et s'opposent à toute variation du courant dans le circuit.

Les inductances sont très couramment utilisées dans les circuits de filtrage, comme celui représenté sur la **figure 14**. Dans ce circuit, la tension d'entrée est une tension alternative. Cette tension est couplée, par l'intermédiaire d'un transformateur, à un dispositif appelé redresseur qui convertit la tension alternative en une tension continue *pulsée*.

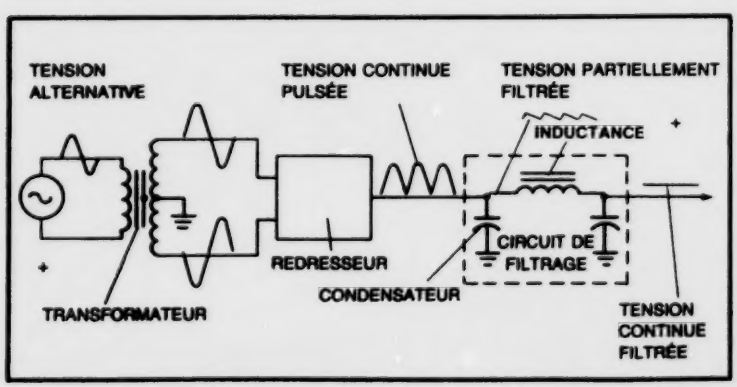


Fig. 14. Le courant continu pulsé est le courant fourni par le redresseur. Il a toujours la même polarité parce qu'il varie de zéro à une valeur maximale positive. Sa valeur n'est pas constante car les impulsions sont semblables aux extrémités d'une onde de courant alternatif.

La tension continue pulsée est délivrée au circuit de filtrage qui se compose de deux condensateurs et d'une inductance. Le condensateur d'entrée accumule pratiquement l'équivalent de la tension alternative de crête pulsée. Cependant, en raison de la variation alternative de la tension, le condensateur se charge et se décharge et la tension présente à la jonction du condensateur et de l'inductance est celle d'un courant continu partiellement filtré.

Même après le filtrage, il reste une faible composante de courant alternatif dans le signal; cette composante de courant alternatif est appelée **ondulation**. Dans un grand nombre d'applications, il faut éliminer cette ondulation avant de pouvoir appliquer effectivement la tension. La fonction de l'inductance est précisément d'éliminer *l'ondulation*. À la jonction entre l'inductance *L* et l'autre condensateur, la tension est continue et filtrée. Le deuxième condensateur continue de filtrer les pulsations et la tension de sortie. Sur le matériel électronique, l'inductance comme celle représentée sur la figure 14 est généralement appelée bobine de filtrage.

Vos activités d'électricien d'entretien d'usine vous amèneront sans doute à rencontrer d'autres applications des inductances.

29 Bobinages à saturation

Lorsqu'on ajoute un deuxième enroulement à une inductance, comme le montre la **figure 15**, et que l'enroulement est alimenté en courant continu, la réactance de l'enroulement à c.a. varie en fonction du courant continu dans l'enroulement de régulation de c.c. Un bobinage de ce type à deux enroulements avec régulation de courant continu est appelé *bobinage à saturation*. Lorsque la tension à c.c. ou le signal augmente dans l'enroulement de régulation (si la résistance *R*, par exemple, varie), la réactance de l'enroulement à c.a. diminue. À mesure que diminue le signal du c.c., la réactance de l'enroulement à c.a. augmente. Ainsi, le bobinage à saturation est une méthode qui permet de régler la réactance dans un circuit à c.a. où le signal est transmis en courant continu.

Les bobinages à saturation sont utilisés pour le même type d'application que les inductances classiques à un seul enroulement. Cependant, contrairement à ces derniers, les bobinages à saturation permettent de faire varier la réactance du bobinage.

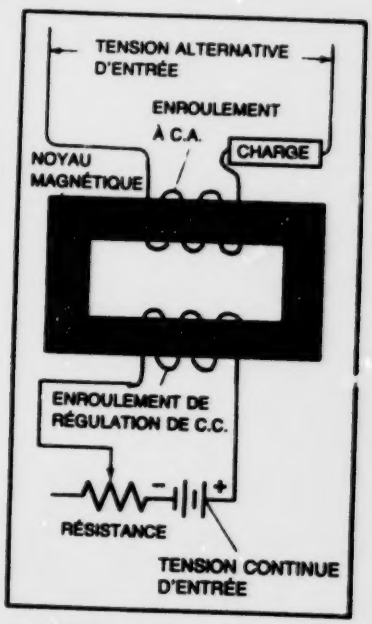


Fig. 15. Les bobinages à saturation sont couramment utilisés dans les équipements industriels de commande et de traitement. Un bobinage de ce type peut être magnétiquement saturé ou plein, tout comme une éponge est saturée ou remplie d'eau.

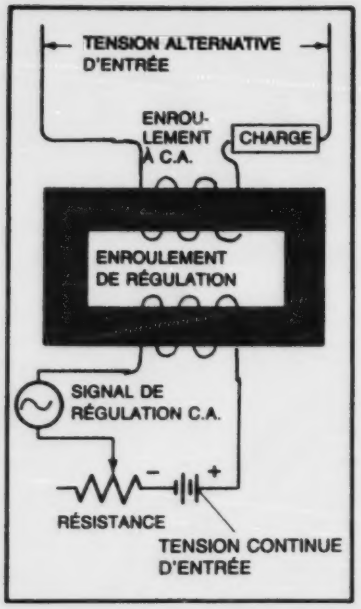


Fig. 16. Grâce à l'amplificateur magnétique, une faible tension alternative peut régler une tension alternative élevée.

30 Amplificateurs magnétiques

Les amplificateurs magnétiques font partie de ce qu'on appelle les bobinages à saturation. En plus du signal de régulation de tension continue qui fait varier la réactance de l'enroulement à c.a., l'amplificateur magnétique a un signal c.a. qui se superpose au signal c.c., comme l'indique la **figure 16**. Ainsi, la réactance de l'enroulement à c.a. varie en même temps que le signal c.a. de l'enroulement de régulation.

Dans un amplificateur magnétique, un faible signal c.a. sur l'enroulement de régulation produit une plus grande variation dans le signal c.a. de l'enroulement c.a. Chaque fois qu'un faible signal d'entrée change le signal de sortie de façon importante, l'appareil a amplifié, ou renforcé, le signal d'entrée avec efficacité.

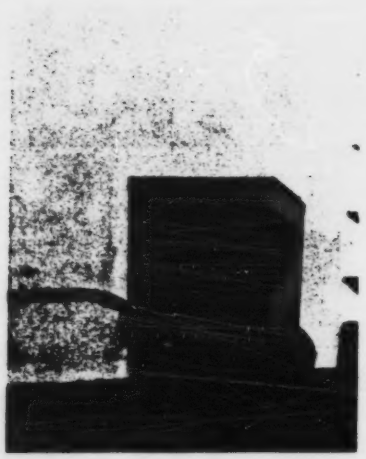


Fig. 17. Les transformateurs secs, comme celui représenté sur cette photo, sont souvent utilisés dans l'industrie pour abaisser la tension de 480 V à 120 V ou 240 V, afin d'alimenter les lampes électriques.

31 Isolation des transformateurs

Les transformateurs utilisés dans l'industrie sont de trois types: sec, isolé à l'askarel et isolé à l'huile. Les transformateurs *secs*, comme celui représenté sur la **figure 17**, n'utilisent aucun liquide pour le refroidissement des enroulements. Ils peuvent être installés sans cabine ignifugée dans n'importe quel local, sauf dans certains locaux dangereux. Les transformateurs dont la puissance nominale est inférieure à 112,5 kVA ou 35 000 V peuvent être installés dans une usine sans qu'il soit nécessaire de prévoir un bâtiment ou une cabine, à condition qu'ils soient isolés des matériaux combustibles.

Les transformateurs *isolés à l'askarel* contiennent des liquides spéciaux ininflammables qui favorisent l'isolation des enroulements et le refroidissement du transformateur. Les transformateurs dont la puissance nominale est supérieure à 25 kVA sont munis de détendeurs et nécessitent une ventilation spéciale lorsqu'ils sont installés dans des pièces mal aérées. Ils sont installés dans des cabines si leur tension nominale dépasse 35 000 V.

Les transformateurs *isolés à l'huile* sont remplis d'huile pour assurer l'isolation des enroulements et le refroidissement du transformateur. En général, les transformateurs isolés à l'huile, quelle que soit leur tension, sont installés dans des cabines lorsqu'ils sont utilisés à l'intérieur d'un bâtiment. Ils sont soit auto-refroidis par des radiateurs exposés à l'atmosphère, comme sur la **figure 18**, soit refroidis par des ventilateurs.

32 Puissance nominale des transformateurs

Les valeurs nominales des petits transformateurs sont généralement exprimées en volts et en ampères secondaires alors que la puissance des gros transformateurs s'exprime en kilovoltampères ou kVA. Les transformateurs alimentant des circuits d'éclairage doivent avoir une capacité minimale égale à la charge connectée totale. Dans les circuits alimentant des lampes à incandescence, la puissance nominale du transformateur en kilovoltampères doit être égale à la puissance totale des lampes. Par exemple, une lampe à incandescence de 10 kW (kilowatts) peut être alimentée par un transformateur fournissant 240 V à 41,7 A (240 × 41,7 = 10 008 VA), soit 10 kVA.

Les charges mécaniques et électriques doivent être calculées comme étant égales à la charge connectée. Dans la pratique, le transformateur doit délivrer autant de kVA que la machine alimentée possède de horse-power. Par exemple, un moteur de 5 horse-power est alimenté par un transformateur de 5 kVA.

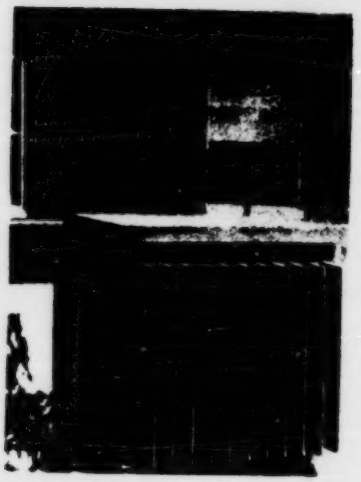


Fig. 13. Transformateur refroidi à l'huile, installé à l'extérieur du bâtiment.

33 Défauts du transformateur

Les plus grands ennemis des transformateurs, surtout des gros transformateurs, sont la chaleur, l'humidité, les vibrations, l'atmosphère corrosive, la poussière et la saleté. Un excès de chaleur et d'humidité peut endommager l'isolation entre les spires ou enroulements, ou entre les enroulements et le noyau magnétique.

Des vibrations excessives peuvent entraîner un desserrement des boulons et des rondelles GROWER qui maintiennent les tôles magnétiques.

Une atmosphère corrosive peut provoquer la détérioration des conducteurs en cuivre et endommager les bornes. La présence de particules métalliques transportées par le circuit d'aération et la poussière peuvent provoquer une mauvaise circulation d'air ou endommager l'isolation, ou les deux.

Comme nous l'avons déjà souligné, les petits transformateurs électroniques comme ceux utilisés dans les amplificateurs, dans les circuits de diffusion publique et dans les petits appareils de commande nécessitent peu d'entretien, à condition que le matériel dans lequel ils sont utilisés soit installé dans des endroits propres, secs et aérés.

Les gros transformateurs dont certains pèsent plusieurs tonnes, nécessitent beaucoup plus d'entretien. L'entretien des transformateurs fera l'objet d'un cours ultérieur.

Exercice de contrôle 3

Vous allez maintenant faire une pause de quelques minutes qui vous permettra de revoir quelques points-clés avant de répondre au questionnaire personnel. Cachez nos réponses puis vérifiez si elles correspondent aux vôtres.

Vos réponses

1. Les deux types de construction de transformateur sont _____ et _____ .

   1. _____
      _____

2. Le courant fourni par un transformateur d'intensité est généralement de:

   A. 1 A
   B. 5 A
   C. 10 A
   D. 100 A

   2. _____

3. Dans le rectangle de la colonne de droite, inscrivez le symbole d'un transformateur abaisseur. Identifiez E_p et E_s.

   Remplissez les espaces vides ci-après à l'aide de l'un des quatre mots énumérés dans la colonne de droite.

   3.

4. *a.* Les petits transformateurs de puissance à un enroulement primaire et plusieurs enroulements secondaires sont appelés transformateurs de puissance _____.
   b. Les transformateurs utilisés pour transformer la tension primaire en une autre valeur, pour l'alimentation de sonnettes, de panneaux lumineux et de redresseurs de chargeurs de batteries sont appelés transformateurs _____ .

   4. de puissance
      de distribution
      électronique(s)
      spécial (spéciaux)
      a. _____
      b. _____

5. Quel(s) est(sont) le(s) courant(s) appliqué(s) à l'enroulement de régulation d'un amplificateur magnétique?

   A. Courant de sortie
   B. Courant de régulation à c.c. uniquement
   C. Courant de signal à c.a. uniquement
   D. Courants de régulation à c.c. et de signal à c.a.

   5. _____

Voir les réponses à la page suivante.

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 3

(fig. 12 inversée) Schéma

1. à noyau:
   à cuirasse — Section 20
2. *B* 5 A — Section 23
3. — Section 25

4. *a.* électroniques — Section 26
   b. spéciaux — Section 27
5. *D* Courants de régulation
   à c.c. et de signal
   à c.a. — Section 30

Examen personnel

Lisez attentivement chacune des phrases suivantes et assurez-vous que vous en comprenez bien le sens. Chaque phrase est suivie de quatre mots ou groupes de mots dont un seul est correct. Faites un X sur la lettre correspondant à votre réponse.

1. Deux bobines de fil enroulées autour d'un noyau magnétique en fer sont les principaux composants:

   A. d'un électro-aimant.
   B. d'un transformateur.
   C. d'un relais.
   D. d'un solénoïde.

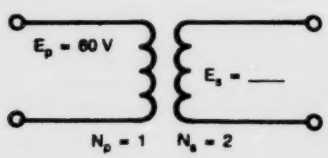
2. L'inductance mutuelle entre deux bobines placées côte à côte est maximale lorsque les bobines sont enroulées autour d'un noyau:

   A. en limaille de cuivre.
   B. en papier huilé.
   C. en fer.
   D. en plastique.

3. Si le primaire d'un transformateur a plus de spires que le secondaire, le secondaire a:

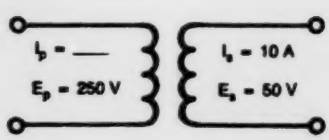
   A. un courant plus faible.
   B. une tension plus faible.
   C. une puissance plus élevée.
   D. une moindre force électromagnétique (en ampères-tours).

4. La tension secondaire du transformateur représenté ci-dessous est de:



   A. 30 V.
   B. 60 V.
   C. 120 V.
   D. 3 600 V.

5. Le courant primaire absorbé par le transformateur suivant est de:



   A. 2 A.
   B. 5 A.
   C. 10 A.
   D. 50 A.

6. La plupart des transformateurs de puissance sur lesquels vous travaillerez en usine sont soit monophasés, soit:

   A. à phase nulle.
   B. biphasés.
   C. triphasés.
   D. tétraphasés.

7. Trois transformateurs monophasés, ayant chacun un courant de phase secondaire de 10 A, sont à couplage Δ-Δ. Le courant de ligne secondaire est de:
   A. 1,73 A.
   B. 17,3 A.
   C. 57,8 A.
   D. 578 A.

8. Les feuilles minces de fer magnétique appelées tôles magnétiques sont utilisées dans le noyau magnétique du transformateur afin de:

   A. réduire les pertes par courants de Foucault.
   B. simplifier le montage du transformateur.
   C. faciliter le remplacement du noyau magnétique.
   D. réduire les coûts du transformateur.

9. Il vous arrivera de travailler sur des transformateurs ayant un enroulement couplé en série avec l'autre enroulement pour former l'équivalent d'un enroulement unique. C'est ce qu'on appelle:

   A. un transformateur de distribution.
   B. un transformateur électronique.
   C. un transformateur spécial.
   D. un autotransformateur.

10. Une bobine dont on peut faire varier la réactance en faisant passer du courant dans un enroulement à c.c. séparé correspond à:

    A. un tube à réactance.
    B. un transformateur d'intensité
    C. un autotransformateur.
    D. un bobinage à saturation.

Les réponses sont données à la page 333.

Les transformateurs

AF0203

(Lexiques)

Français	Anglais
Ampère-tour	Ampere-turn (A)
Auto-inductance	Self-inductance
Autotransformateur	Autotransformer
Bobinage	Reactor
Bobinage à saturation	Saturable reactor
Bobine	Reactor
Bobine (d'inductance)	Inductor
Bobine d'arrêt	Choke (coil)
Bobine de filtrage	Filter choke
Borne de mise à la terre	Grounding lug
Bouton	Knob
Cabine ignifugée	Fireproof vault
Circuit de signalisation	Signal circuit
Condensateur d'entrée	Input capacitor
Courant à vide	No-load current
Courant d'excitation	Exciting current
Courant de charge	Load current
Courant de secteur	Line current
Cuirasse	Shell
Culasse	Yoke
Détendeur	Pressure relief valve
Feuilleté	Laminated
Filtré	Smoothed
Force magnétisante	Magnetizing force
Force magnétomotrice	Magnetomotive force
Fuite magnétique	Magnetic leakage
Inductance mutuelle	Mutual inductance
Jambe du noyau	Core-leg
Lampe à arc	Arc lamp
Limaille de cuivre	Copper filings
Noyau magnétique	Core
Noyau magnétique du transformateur	Transformer core
Ondulation	Ripple
Parafoudre	Surge diverter
Perte de puissance	Power loss
Plaque de connexions	Terminal board
Prise amovible	Tap (movable)
Puissance d'entrée	Input power
Rapport de transformation	Turns ratio
Régulation du transformateur	Regulation of the transformer
Réluctance	Reluctance
Sélecteur	Selector switch
Système de distribution d'eau	Water system
Tension de charge	Load voltage
Tension nominale	Rated voltage

Anglais	Français
Ampere-turn (A)	Ampère-tour
Arc lamp	Lampe à arc
Autotransformer	Autotransformateur
Choke (coil)	Bobine d'arrêt
Commercial transformer	Transformateur industriel
Copper filings	Limaille de cuivre
Core	Noyau magnétique
Core-form transformer	Transformateur à noyau
Core-leg	Jambe du noyau
Current transformer	Transformateur d'intensité
Distribution transformer	Transformateur de distribution
Exciting current	Courant d'excitation
Filter choke	Bobine de filtrage
Fireproof vault	Chambre, cabine ignifugée
Grounding lug	Borne de mise à la terre
Inductor	Bobine (d'inductance)
Input capacitor	Condensateur d'entrée
Input power	Puissance d'entrée
Instrument transformer	Transformateur de mesure
Knob	Bouton
Lamination	Tôle magnétique
Laminated	Feuilleté
Line current	Courant de secteur
Load current	Courant de charge
Load voltage	Tension de charge
Shell-form transformer	Transformateur cuirassé
Magnetic leakage	Fuite magnétique
Magnetizing force	Force magnétisante
Magnetomotive force	Force magnétomotrice
Mutual inductance	Inductance mutuelle
No-load current	Courant à vide
Potential transformer	Transformateur de tension
Power loss	Perte de puissance
Power transformer	Transformateur de puissance
Pressure relief valve	Détendeur
Public address (PA)	Système de diffusion publique
Pulsating voltage	Tension pulsée
Rated voltage	Tension nominale
Reactor	Bobine
Reactor	Bobinage
Regulation of the transformer	Régulation du transformateur
Reluctance	Réluctance
Ripple	Ondulation
Saturable reactor	Bobinage à saturation
Selector switch	Sélecteur
Self-inductance	Auto-inductance

Français	Anglais
Tension pulsée	Pulsating voltage
Tôle magnétique	Lamination
Transformateur à noyau	Core-form transformer
Transformateur abaisseur	Step-down transformer
Transformateur bobiné	Wound-type transformer
Transformateur cuirassé	Shell-form transformer
Transformateur d'intensité	Current transformer
Transformateur de distribution	Distribution transformer
Transformateur de mesure	Instrument transformer
Transformateur de puissance	Power transformer
Transformateur de tension	Potential transformer
Transformateur élévateur	Step-up transformer
Transformateur industriel	Commercial transformer

Anglais	Français
Shell	Cuirasse
Signal circuit	Circuit de signalisation
Smoothed	Filtré
Step-down transformer	Transformateur abaisseur
Step-up transformer	Transformateur élévateur
Surge diverter	Parafoudre
Tap (movable)	Prise amovible
Terminal board	Plaque de connexions
Transformer core	Noyau magnétique du transformateur
Turns ratio	Rapport de transformation
Water system	Système de distribution d'eau
Wound-type transformer	Transformateur bobiné
Yoke	Culasse

Inductance et capacité

AF0204

Inductance et capacité

Objectifs d'enseignement

Pour être en mesure d'assurer convenablement l'entretien des réseaux électriques, il faut bien connaître les composants (pièces) électriques. Deux de ces composants sont les bobines d'inductance et les condensateurs. L'un et l'autre jouent un rôle vital dans les réseaux et les équipements électriques. En tant qu'électricien d'entretien d'usine, vous devez connaître ces composants ainsi que leurs propriétés électriques, soit l'inductance et la capacité.

À la fin du cours, vous devriez être en mesure:

- *D'expliquer les effets de l'inductance et de la capacité.*
- *De parler des facteurs qui influencent l'inductance et la capacité ainsi que de la réactance qu'elles provoquent.*
- *De décrire les effets des réactances inductive et capacitive dans les circuits à c.a.*
- *De faire la distinction entre les différents types de bobines d'inductance et de condensateurs.*
- *D'identifier les différentes méthodes de marquage et codage par couleur utilisées sur les condensateurs.*

Table des matières

Inductance

Intensité du champ magnétique	151
Effets d'un champ magnétique	151
Principe de l'auto-induction	152
Effets de l'auto-induction	152
Propriété de l'inductance	153
Facteurs influençant l'inductance	153
Unité de mesure de l'inductance	153
Exercice de contrôle 1	155

Effets de l'inductance dans les circuits à c.a.

Réactance inductive	156
Loi d'Ohm pour les circuits inductifs	157
Circuits *RL*	158
Impédance	159
Impédance des circuits série *RL*	159
Types de bobines d'inductance	160
Bobines d'inductance variable	161
Coefficient de surtension *Q*	162
Retard dans les circuits inductifs	162
Exercice de contrôle 2	164

Capacité

Condensateur	166
Conditions influençant la capacité	166
Constante diélectrique	167
Rigidité diélectrique	167
Unité de mesure de la capacité	167
Condensateurs montés en parallèle	168
Condensateurs montés en série	168
Exercice de contrôle 3	169

Effets de la capacité sur les circuits à c.a.

Réactance capacitive 170
Loi d'Ohm pour les circuits capacitifs 171
Circuits *RC* 171
Impédance des circuits *RC* série 172
Types de condensateurs 173
Identification des condensateurs 174
Condensateurs électrolytiques multiples 175
Facteur de dissipation 175
Retard des circuits capacitifs 176
Exercice de contrôle 4 177

Examen personnel 178

Lexiques 180

Inductance

1 Intensité du champ magnétique

Comme vous l'avez déjà appris, lorsqu'un courant circule dans un conducteur, le conducteur est entouré d'un champ magnétique comme le montre la figure 1(*a*). On suppose ici que le sens du courant est *conventionnel*, soit du pôle positif (+) vers le pôle négatif (-). L'intensité de ce champ magnétique dépend du courant qui circule dans le conducteur: plus le flux de courant est élevé, plus l'intensité du champ magnétique est grande.

Cependant, augmenter le flux de courant dans le conducteur n'est pas la seule manière d'augmenter l'intensité du champ magnétique. Un autre moyen consiste à enrouler le conducteur sous forme de bobine, comme en (*b*), ce qui rend le champ magnétique environnant beaucoup plus intense que le champ entourant le conducteur. La troisième possibilité pour augmenter l'intensité du champ consiste à enrouler le conducteur sous forme de bobine autour d'une substance magnétique, comme le fer ou l'acier.

2 Effets d'un champ magnétique

Toutes les fois qu'un *changement* survient dans le nombre de lignes de force magnétiques passant à l'intérieur d'un conducteur bobiné (ou reliées à celui-ci), une f.é.m. (force électromotrice), ou tension, est générée dans la bobine. Cette f.é.m. peut être produite de différentes manières:

1. par *induction électromagnétique*, si la variation de la liaison magnétique est provoquée par le *mouvement relatif* entre la bobine et la source magnétique, comme dans un générateur.
2. par *induction mutuelle*, si la variation de la liaison magnétique est provoquée par une *variation du champ magnétique* en l'absence de mouvement relatif, comme dans un transformateur.

Fig. 1. Le champ magnétique entourant un conducteur (ou une bobine) est indiqué par les lignes de force magnétiques. Le nombre de lignes indique l'intensité du champ.

3. par *auto-induction*, si la variation de la liaison magnétique est provoquée par une *variation du courant* acheminé par la bobine même.

Dans le présent cours, nous n'aborderons que le troisième type d'induction, c'est-à-dire l'auto-induction et ses effets.

3 Principe de l'auto-induction

Lorsque le courant d'une bobine change brutalement, le nombre de lignes de force magnétiques qui l'entourent change également et il y a, par conséquent, induction d'une f.é.m. dans le conducteur. Cette f.é.m. auto-induite s'oppose au courant existant dans la bobine et tend à empêcher les variations de courant. Le courant atteint finalement sa valeur maximale qui est déterminée par la résistance de la bobine et la tension appliquée. Mais la variation du courant ne se produit pas sur-le-champ: dans une certaine mesure, la f.é.m. induite lui oppose une résistance.

Si le courant existant augmente brutalement, la f.é.m. induite tend à empêcher cette augmentation de courant. Inversement, si le courant existant *diminue* brutalement, la f.é.m. induite tend à empêcher cette baisse de courant.

4 Effets de l'auto-induction

La f.é.m. auto-induite est également appelée force contre-électromotrice. La f.é.m. auto-induite tend toujours à s'opposer aux variations du courant. Voici *les effets de l'auto-induction:*

1. Elle s'oppose au flux de courant lorsque le circuit est fermé.
2. Elle tend à prolonger le flux de courant lorsque le circuit est ouvert.
3. Elle tend à maintenir le courant constant lorsque la f.é.m. appliquée augmente ou diminue.

Pour simplifier, la f.é.m. auto-induite joue, sur une bobine, le même rôle que le volant sur un moteur. Le volant aide le moteur à tourner à vitesse constante. La f.é.m. auto-induite s'oppose à toute variation du courant et tend à maintenir ce dernier à une valeur constante.

5 Propriété de l'inductance

L'*inductance* est la propriété d'un conducteur ou d'un circuit électrique qui tend à s'opposer, à cause de l'auto-induction, à la variation du courant électrique qui y circule. Un circuit inductif résiste à toute variation (surtout soudaine) du courant qui le traverse. Dans un circuit inductif, toute variation de courant est légèrement *retardée*. En d'autres termes, **l'inductance a pour effet de retarder le courant dans un circuit.**

Tous les circuits sont plus ou moins inductifs. L'inductance peut être répartie dans le circuit ou concentrée dans un seul composant comme une bobine ou un transformateur. **L'inductance d'un fil droit est répartie tandis que celle d'une bobine est concentrée.**

6 Facteurs influençant l'inductance

La valeur de l'inductance dépend de la longueur du conducteur et de sa forme, droite ou bobinée. Un conducteur droit a une inductance très faible tandis qu'une bobine a une inductance plus élevée. La différence dépend essentiellement (1) des dimensions et de la forme de la bobine, (2) du nombre de spires, (3) du nombre de couches et (4) du type de matériau magnétique.

Le fil bobiné représenté sur la figure 1(*b*) est une simple *bobine à air*. Si la bobine est enroulée autour d'un support ou d'un tube non magnétique (plastique ou porcelaine), il s'agit toujours d'une bobine à air (fig. 2). Si la même bobine est enroulée autour d'un support ou d'un noyau magnétique comme le fer, la bobine à noyau de fer a une inductance beaucoup plus élevée. L'augmentation de la force, ou du flux magnétique, est due à la perméabilité du matériau dans lequel le noyau est fabriqué. La *perméabilité* **permet de mesurer l'aptitude d'un matériau à laisser passer le flux magnétique.**

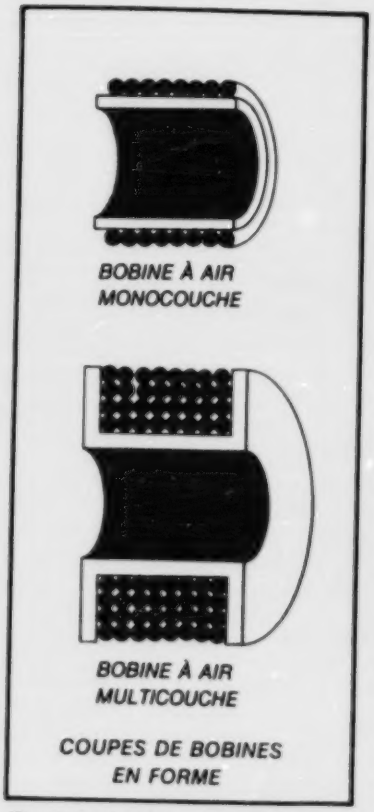


Fig. 2. La bobine multicouche, formée de quatre couches à huit spires, a une inductance quatre fois supérieure à celle d'une bobine monocouche à huit spires.

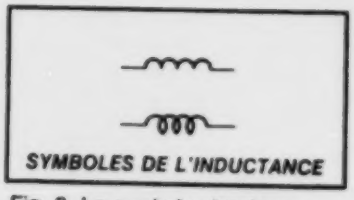


Fig. 3. Le symbole classique d'une bobine d'inductance représente une série de boucles. Les deux symboles représentés ci-dessus peuvent être utilisés dans les schémas pour désigner une bobine, un enroulement ou tout autre dispositif inductif.

7 Unité de mesure de l'inductance

Deux symboles d'inductance sont représentés sur la **figure 3**. La lettre qui désigne l'inductance est la lettre *L* et l'unité de mesure de l'induc-

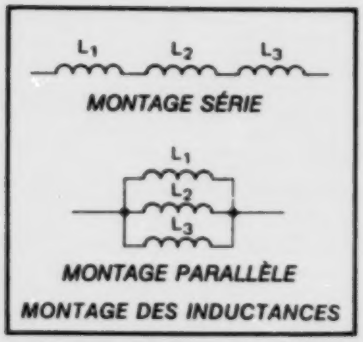


Fig. 4. Des inductances en série produisent une inductance totale égale à la *somme* des inductances individuelles. Les inductances en *parallèle* produisent une inductance totale inférieure à la *plus petite* des inductances en dérivation.

tance est le henry, désigné par la lettre *H*. Une inductance égale à 1 henry produit une force contre-électromotrice (ou une contre-tension) de 1 volt lorsque le courant qui y circule varie à la vitesse de 1 ampère par seconde.

Le henry est une grande unité. Les seules bobines d'inductance pour lesquelles on utilise les henrys sont celles conçues pour les basses fréquences. Par exemple, une inductance conçue pour une alimentation électrique peut avoir une valeur comprise entre 1 et 20 H.

Lorsqu'il s'agit de régler des signaux à c.a. haute fréquence, ce qui est le cas pour la radio et la télévision, on utilise des inductances de valeur plus faible. La valeur nominale de ces inductances est exprimée en millihenrys (mH) ou en microhenrys (μH). Ainsi:

1 H = 1000 mH
1 H = 1 000 000 μH
1 mH = 0,001 H
1 μH = 0,000 001 H

Le premier symbole utilisé dans l'abréviation des microhenrys (μ) est la lettre grecque mu, qui signifie «micro».

Les bobines d'inductance, également appelées inductances, peuvent être montées, soit en série, soit en parallèle, comme le montre la **figure 4.** Si elles sont montées en *série*, les inductances s'additionnent comme les résistances série. Si elles sont montées en *parallèle*, l'inductance totale, comme les résistances parallèle, est inférieure à la plus *petite* des inductances en dérivation.

Exercice de contrôle 1

Vous allez maintenant faire une petite pause pour revoir quelques points-clés. Si vos réponses sont différentes des nôtres, vous trouverez l'explication en vous reportant à la section indiquée en face de chaque réponse.

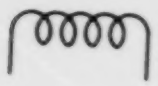
Vos réponses

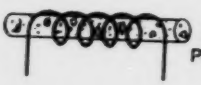
1. Si vous deviez enrouler un conducteur droit sous forme de bobine, son champ magnétique serait (inférieur, supérieur) _____ à celui du conducteur droit d'origine. 1. _____

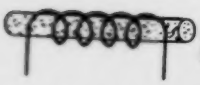
2. Supposons que vous raccordiez en série une bobine à un interrupteur et une batterie. Si vous ouvrez et fermez plusieurs fois l'interrupteur, vous produisez une f.é.m. par (induction électromagnétique, auto-induction) _____ . 2. _____

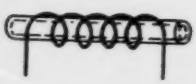
3. La propriété d'une bobine qui tend à s'opposer à une variation du courant est appelée: 3. _____
   A. induction mutuelle.
   B. inductance.
   C. courant conventionnel
   D. résistance.

4. Supposons que le conducteur ait les mêmes dimensions et la même longueur dans tous les exemples suivants. Lequel aurait probablement l'inductance la plus élevée? 4. _____

A.  NOYAU À AIR SIMPLE

C.  NOYAU DE PLASTIQUE

B.  NOYAU DE FER

D.  NOYAU DE PORCELAINE

5. Parmi les valeurs d'inductance suivantes, quelle est la plus élevée? 5. _____
   A. 0,1 H
   B. 2 μH
   C. 30 μH
   D. 4 mH

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 1

1. supérieur
2. auto-induction
3. *B* inductance
4. *B* Noyau de fer

Section 1
Section 2
Section 5
Section 6

5. *A* 0,1 H (Les autres valeurs sont toutes inférieures à 0,1 H; *A* = 0,1 H; *B* = 0,000 002 H; *C* = 0,000 03 H; et *D* = 0,004 H.)

Section 7

Effets de l'inductance dans les circuits à c.a.

8 Réactance inductive

Dans un circuit à c.a., l'inductance provoque une *opposition au flux de courant* et *un retard des ondes de courant* sur les ondes de tension. Ces effets sont représentés sur la **figure 5. L'opposition au flux de courant provoquée par l'inductance est appelée réactance inductive. Elle est mesurée en ohms, comme la résistance, mais elle correspond à une opposition au courant alternatif**. En réalité, c'est une opposition à la *variation du courant*.

Il n'y a pas de réactance inductive dans les circuits à c.c. (courant continu) parce que le courant et la tension ne changent pas. Seule une variation du courant provoque une *variation* du couplage inductif avec le conducteur et induit une tension dans le circuit.

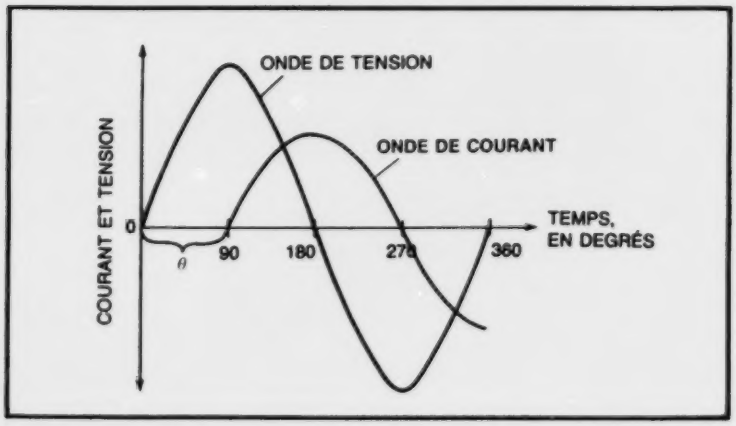


Fig. 5. Dans un circuit à c.a., la réactance inductive provoque un *retard* ou un déphasage de 90° (degrés) de l'onde de courant sur l'onde de tension. En d'autres termes, la tension est en avance sur le courant.

Pour se rappeler ce rapport de phase, il existe un moyen très simple, à savoir le mot *ELI*: la tension *E* dans une inductance *L* est en avance sur le courant *I*. La différence de phase entre les deux ondes est appelée «angle de phase» et est généralement désignée par la lettre grecque thêta (θ).

La réactance inductive à une certaine fréquence peut être déterminée d'après la formule suivante:

$$X_L = 2\pi fL$$

où X_L = réactance inductive, en ohms
π = 3,14, une constante (π étant la lettre grecque *pi*)
f = fréquence de la tension appliquée, en hertz
L = valeur de l'inductance, en henrys

Si la valeur de l'inductance est exprimée en millihenrys ou en microhenrys, il faut d'abord la convertir en *henrys* avant de pouvoir l'utiliser dans la formule de la réactance.

Par exemple, dans un circuit de 60 Hz (hertz), une inductance de 10 H aurait une réactance inductive de:

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL \\ &= 2 \times 3{,}14 \times 60 \times 10 \\ &= 3770\ \Omega \text{ (ohms) environ} \end{aligned}$$

Dans la formule, vous noterez que la lettre grecque pi, π, désigne la constante 3,14; par ailleurs la lettre grecque omega, Ω, représente les ohms.

D'après la formule, on observe que la réactance inductive X_L augmente avec la fréquence f.

9 Loi d'Ohm pour les circuits inductifs

La figure 6 est le diagramme schématique d'un circuit purement résistif. Si un courant alternatif circule dans un tel circuit, ou dans un circuit contenant seulement une résistance, sans réactance inductive, la loi d'Ohm s'applique alors de la même manière que pour un circuit à c.c. Dans les circuits résistifs à c.a., le courant est *en phase* par rapport à la tension, comme le montrent les ondes représentées sur la figure 6.

Un *circuit purement réactif* est un circuit contenant seulement une réactance inductive et aucune résistance. Dans un tel circuit, le courant est en *retard* de 90° sur la tension, comme l'indiquent les ondes représentées sur la figure 5, et est appelé *courant inductif réactif*. On peut le déterminer d'après une formule similaire à la loi d'Ohm, soit:

$$I_L = \frac{E}{X_L}$$

où: I_L = courant inductif réactif, en ampères
E = tension appliquée, en volts
X_L = réactance inductive, en ohms.

Par exemple, si une bobine ayant une réactance inductive de 20 Ω est raccordée à un circuit de 120 V (volts), 60 Hz, le courant inductif réactif est égal à:

$$I_L = \frac{E}{X_L} = \frac{120}{20} = 6 \text{ A (ampères)}$$

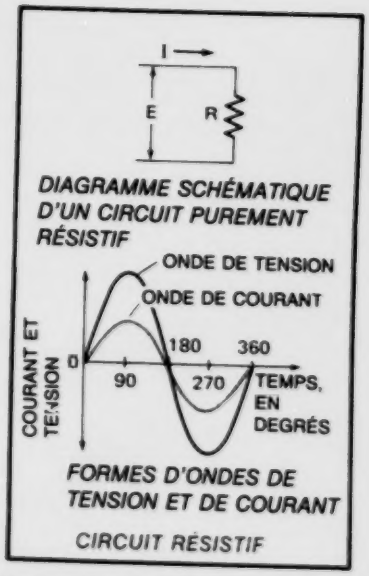


Fig. 6. Un circuit résistif peut contenir des résistances de chauffage et des lampes électriques. Tous ces appareils produisent de la chaleur et consomment de l'électricité, mais le rapport de phase entre les ondes de tension et les ondes de courant ne change pas. Dans un circuit résistif, les deux ondes passent en même temps par les points 0°, 180° et 360°.

Le courant inductif réactif ne produit *pas* de chaleur ni de puissance pouvant être transformée en puissance mécanique utile, mais il peut être utilisé comme courant de magnétisation dans les bobines.

10 Circuits *RL*

Dans la pratique, un circuit ayant une réactance due à une inductance L a généralement aussi une certaine résistance R. Un tel circuit, appelé «circuit *RL*,» est représenté sur le diagramme schématique de la **figure 7.** Puisque le circuit a une résistance R et une réactance inductive X_L, le décalage de phase, ou angle de phase θ, se situe entre 0° et 90°.

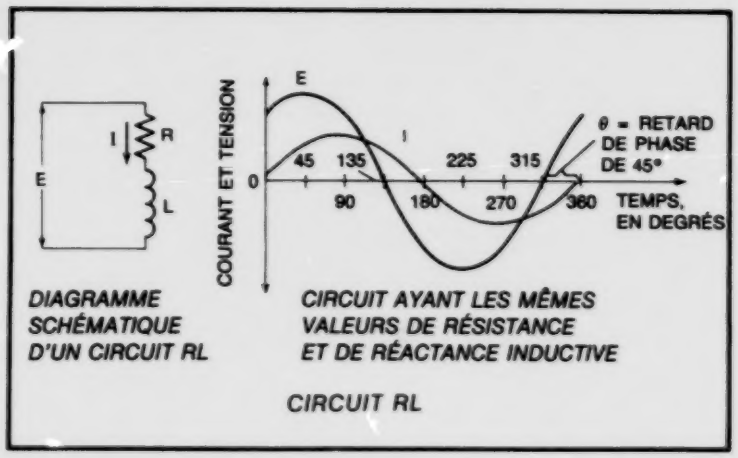


Fig. 7. Une certaine résistance est présente dans les circuits à c.a., soit dans les conducteurs, soit dans les bobines (également appelées «inductances»). Ce phénomène est graphiquement illustré par la résistance *R* montée en série avec l'inductance *L*. Dans un circuit *RL* série, le courant est en *retard* sur la tension.

Plus la résistance du circuit est grande, par rapport à la réactance inductive, plus le déphasage est petit. Dans un circuit *RL* ayant la même résistance et réactance inductive, l'onde de courant est en retard sur l'onde de tension de 45°, soit $\theta = 45°$, comme le montre la figure 7. Si la résistance est supérieure à la réactance du circuit, l'angle de phase est compris entre 0° et 45°. Si la réactance est supérieure à la résistance, l'angle de phase est compris entre 45° et 90°. Par exemple, un moteur (qui est inductif) peut engendrer un déphasage de 25° environ.

Le déphasage entre les ondes de tension et de courant détermine le *facteur de puissance*. Le facteur de puissance est un élé-

ment très important dans la détermination de la puissance utile d'un circuit à c.a.

11 Impédance

L'*impédance* d'un circuit *RL* correspond à son *opposition totale* au passage du courant alternatif, y compris la résistance et la réactance inductive. Elle est mesurée en ohms. Voici la formule qui permet de déterminer l'impédance lorsque la tension et le courant sont connus:

$$Z = \frac{E}{I}$$

où: Z = impédance, en ohms
E = tension, en volts
I = courant, en ampères

La formule est semblable à la loi d'Ohm servant à calculer la résistance totale des circuits à c.c. Par exemple, l'impédance Z d'un circuit à c.a. de 120 V dans lequel circule un courant de 24 A est égale à:

$$Z = \frac{E}{I} = \frac{120}{24} = 5\ \Omega$$

12 Impédance des circuits série RL

Lorsqu'un circuit série possède à la fois une résistance et une réactance inductive, l'impédance Z est supérieure à la résistance R et à la réactance X_L, prises séparément. Par exemple, dans le circuit série à c.a. représenté sur la **figure 8**, dont la résistance est de 3 Ω et la réactance inductive de 4 Ω, l'opposition totale au flux de courant est supérieure à 3Ω et à 4Ω.

On ne *peut pas additionner directement la résistance et la réactance* (ce qu'on peut faire pour deux résistances) pour déterminer l'impédance: il faut appliquer la formule de la règle des carrés.

Pour comprendre l'application de cette formule, raisonnons sur un triangle droit comme celui représenté sur la **figure 8**: un côté représente la résistance R, l'autre côté la réactance inductive X_L. L'impé-

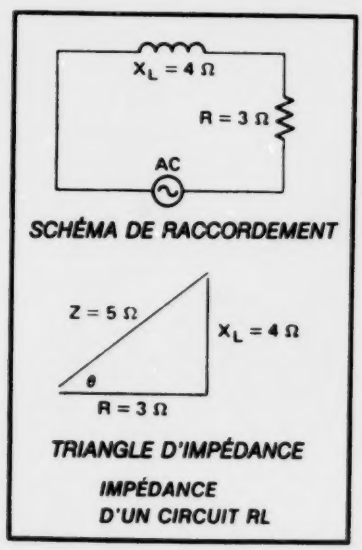


Fig. 8. Les effets combinés de la résistance et de la réactance inductive X_L dans un circuit série à c.a. provoquent un déphasage du courant et de la tension. L'opposition totale au flux de courant est l'impédance Z.

dance Z est alors représentée par le plus grand côté, appelé hypoténuse, du triangle rectangle. Ces trois côtés forment un triangle d'impédance. On peut déterminer la longueur de l'hypoténuse Z par les valeurs R et X_L données selon la formule de la règle des carrés:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}^{1}$$

où: Z = impédance, en ohms
R = résistance, en ohms
X_L = réactance inductive, en ohms

Ainsi, le circuit représenté sur la figure 8, dont la résistance $R = 3\Omega$ et la réactance inductive $X_L = 4\ \Omega$, a une impédance de:

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} \\ &= \sqrt{3^2 + 4^2} = \sqrt{9 + 16} \\ &= \sqrt{25} = 5\ \Omega \end{aligned}$$

Les valeurs relatives de X_L et de R dans un circuit déterminent le niveau de déphasage entre le courant et la tension dans le circuit. Dans un *circuit purement inductif*, le courant est en retard de 90° sur la tension. Si X_L est supérieure à R, l'angle de phase est compris entre 45° et 90°. Si X_L est égale à R, le déphasage est de 45°. Enfin, si R est supérieur à X_L, l'angle de phase est compris entre 45° et 90°.

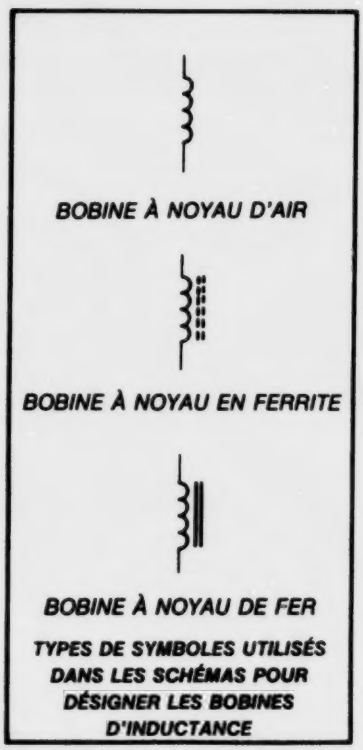


Fig. 9. Sur le symbole désignant la bobine à noyau en ferrite, le noyau est représenté en pointillé; les lignes continues sur le dernier symbole signifient que la bobine a un noyau de fer ou en ferrite.

13 Types de bobines d'inductance

La **figure 9** représente plusieurs symboles normalisés utilisés dans les schémas électriques pour désigner différents types de bobines d'inductance. La plupart des bobines utilisées dans les récepteurs de radio et de télévision sont du type *bobine à air*. Certaines bobines ont un noyau en poudre de fer, souvent appelé *noyau en ferrite*, pour augmenter l'inductance de la bobine. Un noyau en ferrite est constitué de petites particules de matériau magnétique maintenues par un produit isolant appelé «liant».

Les bobines d'inductance du type à air et à noyau en ferrite sont l'une et l'autre utilisées dans les récepteurs de radio et de télévision comme bobines d'antenne, de charge, d'accord, et comme bobines oscillatrices.

Les bobines à noyau de fer enroulées autour d'un noyau laminé en fer, en acier ou fait d'un autre matériau, sont utilisées comme enroulements, bobines d'arrêt et transformateurs. Elles sont également utilisées dans les génératrices et les moteurs à c.a. lorsque les courants alternatifs doivent être contrôlés.

1. Certains ouvrages appelent ce type d'opération: SOMME VECTORIELLE.

14 Bobines d'inductance variable

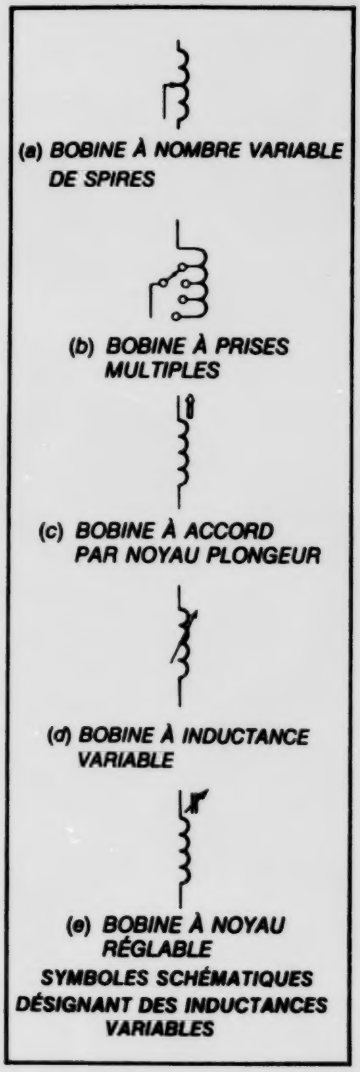
La **figure 10**, (*a*) à (*e*), représente plusieurs symboles désignant des bobines d'inductance variable. Le symbole en (*a*) désigne une bobine ayant un *nombre variable de spires*. La flèche utilisée sur le symbole peut représenter une pince qui peut être déplacée pour créer un contact en différents points de l'enroulement. Elle peut également représenter un contact coulissant qui peut être déplacé sur la longueur de la bobine pour toucher chaque spire distincte, l'une après l'autre. La position du contact mobile indique dans quelle mesure la bobine est effectivement utilisée dans le circuit.

Le symbole en (*b*) désigne une *bobine à prises* et un *interrupteur*. Dans le schéma, l'interrupteur est raccordé à la première des quatre prises. Le niveau d'inductance utilisé dans le circuit peut être sélectionné en réglant la position de l'interrupteur.

Le symbole représenté sur la **figure 10** (*c*) désigne une *bobine à accord par noyau plongeur*. La flèche transparente indique que la bobine a un noyau non magnétique, en laiton par exemple. Un noyau non magnétique provoque une baisse (et non une augmentation) de l'inductance, car une plus grande partie du noyau plongeur est entourée par la bobine. Au fur et à mesure que le noyau plongeur sort de l'enroulement, l'inductance augmente.

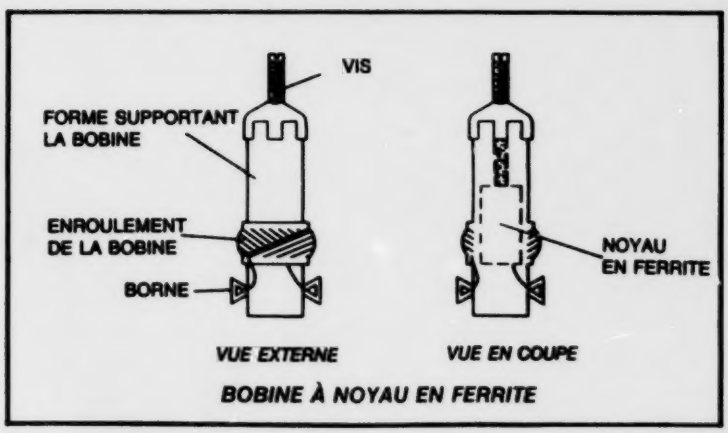
Le symbole représenté en (*d*) est un symbole général désignant une inductance variable quelconque. La flèche qui traverse la bobine indique qu'il s'agit d'une inductance variable bien que le niveau de variation ne soit pas défini.

Dans certaines bobines, comme celle désignée par le symbole sur la **figure 10(*e*)**, on peut régler l'inductance en déplaçant le noyau en ferrite à l'intérieur et à l'extérieur de la bobine. La figure 11 montre la construction d'une telle bobine à noyau en ferrite réglable.



SYMBOLES SCHÉMATIQUES DÉSIGNANT DES INDUCTANCES VARIABLES

Fig. 10. Différentes méthodes sont utilisées pour obtenir une inductance variable, dont l'emploi de prises, de contacts coulissants et de noyaux réglables.



BOBINE À NOYAU EN FERRITE

Fig. 11. Lorsque le noyau en ferrite réglable est complètement entouré par l'enroulement de la bobine, l'inductance est maximale. Mais, lorsque le noyau n'est que partiellement à l'intérieur de la bobine, l'inductance est réduite.

15 Coefficient de surtension Q

Le coefficient de surtension Q d'une bobine (qui correspond à une évaluation de son rendement), permet de mesurer le bon fonctionnement d'une bobine d'inductance. Si une bobine a un coefficient Q élevé, cela signifie que les pertes dans la bobine sont faibles. On détermine le coefficient Q par la formule suivante:

$$Q = \frac{X_L}{R}$$

où X_L est la réactance inductive de la bobine (à la fréquence spécifiée) et R, la résistance. Les deux valeurs sont exprimées en ohms. Le coefficient Q d'une bobine n'est qu'un rapport et ne peut être exprimé par une unité de mesure.

16 Retard dans les circuits inductifs

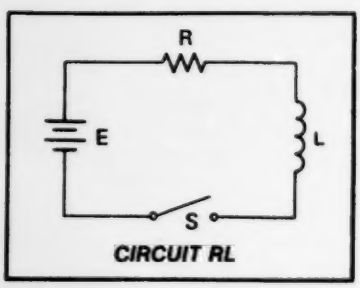


Fig. 12. Lorsque l'interrupteur est fermé, un retard se produit avant qu'un courant maximal ne puisse circuler. La durée de ce retard dépend des valeurs de l'inductance et de la résistance.

Lorsqu'un courant continu est appliqué à une inductance, il se produit un *retard* (en raison de l'auto-induction) avant que le courant n'atteigne sa valeur maximale. Dans le circuit représenté sur la **figure 12**, la fermeture de l'interrupteur S provoque le passage du courant de la batterie E vers la bobine L, à travers la résistance R. S'il n'y avait pas de bobine dans le circuit, le courant atteindrait instantanément sa valeur maximale (déterminée par la résistance totale dans le circuit et la tension de la batterie). Cependant, à cause de la présence de la bobine dans le circuit, l'intensité du courant augmente d'abord sensiblement, puis plus graduellement jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale.

Le temps nécessaire pour que le courant augmente jusqu'à 63% de sa valeur maximale est appelé *constante de temps*.

Supposons maintenant que l'interrupteur S de la figure 12 soit resté fermé pendant une période prolongée, de façon qu'un courant maximal circule. Si l'on ouvre alors l'interrupteur S, il faut une constante de temps pour que le courant présent dans la bobine tombe à 37% de sa valeur maximale.

Une constante de temps peut être déterminée d'après la formule:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

où τ = temps, en secondes (constante de temps)
L = inductance de la bobine, en henrys
R = résistance du circuit, en ohms

Par exemple, si L est égale à 30 H et R à 15 Ω, la constante de temps est égale à

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{30}{15} = 2 \text{ s (secondes)}$$

Exercice de contrôle 2

Il est temps de faire une deuxième pause pour vérifier vos connaissances. Comparez vos réponses aux nôtres et, si nécessaire, révisez les sections citées en référence.

Vos réponses

1. Des circuits suivants, quel est celui qui a une réactance inductive? — 1. _____

A.

C.

B.

D.

2. Si la fréquence d'un circuit à c.a. diminue, la réactance inductive (augmente, diminue, reste constante) _____ . — 2. _____

3. Si un moteur à c.a. de 20 V a une réactance inductive de 4 Ω, l'intensité du courant du moteur est égale à: — 3. _____

A. 5 A. *C.* 24 A.
B. 16 A. *D.* 80 A.

4. Un courant inductif réactif (produit, ne produit pas) _____ de (la) chaleur ou de (la) puissance. — 4. _____

5. Votre contremaître vous demande de mesurer la résistance et la réactance inductive d'un circuit à c.a. Vous déterminez que la résistance est de 12 Ω et la réactance inductive de 8 Ω. Vous savez donc que l'angle de phase est compris entre (0° et 45°, 45° et 90°) _____ . — 5. _____

6. Si l'intensité du courant dans un circuit à c.a. alimenté par une tension de 2 V est égale à 8 A, l'impédance du circuit est de: — 6. _____

A. 1/4 Ω *C.* 6 Ω
B. 4 Ω *D.* 16 Ω

7. Un noyau en poudre de fer est généralement appelé noyau _____ . — 7. _____

A. hypoténuse *C.* non magnétique
B. en porcelaine *D.* en ferrite

8. Vous pouvez utiliser le coefficient de surtension *Q* pour évaluer le bon fonctionnement d'une bobine. Supposez que vous ayez deux bobines de la même réactance, à savoir 24 Ω. La bobine A a une résistance de 8 Ω et la bobine B, de 6 Ω. Des deux bobines A et B, quelle est celle qui a le coefficient *Q* le plus faible? — 8. _____

Voir les réponses à la page suivante.

Vos réponses

9. La constante de temps correspond au temps nécessaire pour que le courant d'un circuit inductif à c.c. atteigne _____ de sa valeur maximale.

   A. 15% *C.* 45%
   B. 37% *D.* 63%

9. _____

Au regard du symbole représenté dans la colonne de droite, inscrivez la lettre correspondant à la bonne désignation.

10. *a.* Bobine à noyau réglable
    b. Bobine à accord par noyau plongeur
    c. Bobine à nombre variable de spires
    d. Bobine à air
    e. Bobine à prises et interrupteur
    f. Bobine à noyau de fer

10. ____

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 2

1. *B* Section 8
   (Le circuit représenté en *B* est le seul qui ait une source de c.a. et une inductance.)
2. diminue Section 8
3. A 5 A Section 9
   $(I = \frac{E}{X_L} = \frac{20}{4} = 5\ \text{A})$
4. ne produit pas Section 9
5. 0° et 45° Section 10
   (La valeur de la résistance est supérieure à celle de la réactance.)
6. A $\frac{1}{4}\ \Omega$ Section 11
   $(Z = \frac{E}{I} = \frac{2}{8} = \frac{1}{4}\ \Omega)$
7. *D* en ferrite Section 13
8. Bobine A Section 15
   (Pour la bobine A:
   $Q = \frac{X_L}{R} = \frac{24}{8}$
   = 3; pour la bobine B:
   $Q = \frac{X_L}{R}$
   $= \frac{24}{6} = 4$. La bobine A a un coefficient *Q* inférieur à celui de la bobine B.)
9. *D* 63% Section 16
10. *d* Section 13, figure 9
    c Section 14, figure 10(*a*)
    f Section 13, figure 9
    b Section 14, figure 10(*c*)
    a Section 14, figure 10(*e*)
    e Section 14, figure 10(*b*)

Capacité

17 Condensateur

La *capacité électrique* est l'aptitude des appareils ou des composants électriques à recevoir et à garder des charges électriques. Lorsque deux surfaces conductrices sont séparées par un matériau non conducteur, elles forment un *condensateur*. Les surfaces conductrices du condensateur sont capables d'emmagasiner des charges électriques. (Vous avez appris, dans un cours précédent, que les électrons sont des charges et que le courant représente le mouvement des électrons.)

La **figure 13** représente un condensateur élémentaire raccordé à une batterie par un interrupteur. Les deux surfaces conductrices sont appelées *plaques*; elles sont généralement parallèles. Le matériau non conducteur entre celles-ci est appelé *diélectrique*. (Bien que la plupart des condensateurs soient constitués de plusieurs plaques parallèles, séparées de couches de diélectrique, nous ne parlerons que du condensateur élémentaire de la figure 13.)

Lorsque l'interrupteur de la figure 13 est fermé, des charges électriques se déplacent de la batterie vers les plaques du condensateur. Puisque le matériau placé entre les plaques n'est pas conducteur, les charges sont piégées sur les plaques et y restent jusqu'à ce qu'elles trouvent un chemin pour compléter leur trajectoire autour du circuit.

L'unité de charge d'un condensateur est le *coulomb*. Pour tout condensateur, la valeur de la *capacité reste constante*: une élévation de la tension provoque une augmentation de la charge, sans modifier la capacité du condensateur.

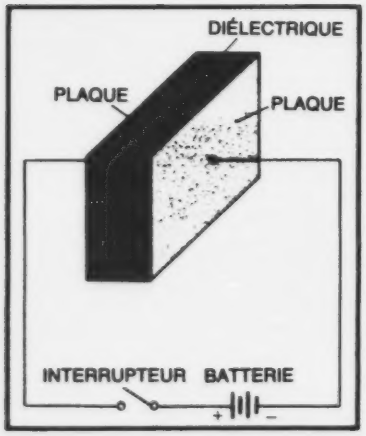


Fig. 13. Aucun transfert physique de charges ne se produit entre les plaques d'un condensateur. Puisque les plaques sont séparées par un isolant (ou diélectrique), les charges ne traversent pas le condensateur. La charge et la décharge des plaques dans le circuit externe donnent l'impression que des charges (le courant) traversent le condensateur.

18 Conditions influençant la capacité

La capacité est fonction de la surface des plaques du condensateur, de la distance entre celles-ci et du type de matériau diélectrique utilisé.

Si deux condensateurs ont le même matériau diélectrique et la même distance entre les plaques, c'est le condensateur doté des plus grandes plaques qui aura la capacité la plus élevée.

Mais si deux condensateurs ont le même matériau diélectrique et des plaques de même surface, c'est le condensateur ayant les plaques les plus rapprochées qui aura la capacité la plus élevée.

Enfin, si deux condensateurs ont des plaques de même surface séparées par la même distance, la capacité dépendra du matériau diélectrique utilisé. Si l'un des condensateurs utilise un mauvais matériau diélectrique comme l'air, et l'autre un bon matériau diélectrique comme le verre, le mica, l'huile ou le caoutchouc, ce dernier aura une capacité plus élevée.

19 Constante diélectrique

L'efficacité relative des matériaux utilisés comme diélectriques est déterminée par leur *constante diélectrique K*. La constante diélectrique d'un matériau indique le degré d'efficacité de ce matériau, utilisé comme diélectrique entre les plaques d'un condensateur, par rapport à l'air. On trouvera ci-contre, sous forme de tableau, quelques matériaux diélectriques courants et leur constante diélectrique respective. Par exemple, si un condensateur au mica et un condensateur à air ont les mêmes dimensions physiques, la capacité du condensateur au mica sera environ six fois supérieure à celle du condensateur à air.

Constantes diélectriques de différents matériaux

Matériau diélectrique	Constante diélectrique *K* (valeur type)
Air	1,0
Papier	2,0
Huile	2,1
Caoutchouc	3,0
Mica	6,0
Verre	8,0

20 Rigidité diélectrique

La *rigidité diélectrique* est la tension maximale qu'un diélectrique peut supporter sans subir de percement ni de rupture. Un matériau isolant peut avoir une résistance très élevée lorsque celle-ci est mesurée à basse tension alors que sa résistance à un courant à très haute tension peut être faible.

21 Unité de mesure de la capacité

L'unité de mesure de la capacité est le *farad*. Cependant, cette unité est trop grande pour les condensateurs courants: les unités de mesure de capacité couramment utilisées sont le *microfarad* et le *picofarad*. Le microfarad (μF) est égal à un millionième de farad (F); le picofarad (pF) est égal à un millionième de microfarad, soit:

$$1 \text{ F} = 1\,000\,000\ \mu\text{F}$$

$$1\ \mu\text{F} = 1\,000\,000 \text{ pF}$$

22 Condensateurs montés en parallèle

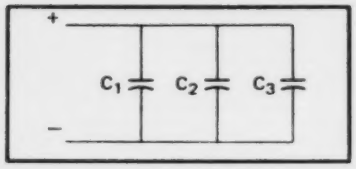


Fig. 14. Lorsque plusieurs condensateurs de même valeur sont montés en parallèle, la capacité totale est égale à la capacité d'un condensateur multipliée par le nombre de condensateurs montés en parallèle. Par exemple, la capacité totale de trois condensateurs en parallèle d'une valeur de 12 μF est égale à: 3 × 12 = 36 μF.

Lorsque plusieurs condensateurs sont montés en *parallèle*, leur capacité combinée est égale à la somme des capacités individuelles. Par exemple, si C_1, C_2 et C_3 représentent les capacités des trois condensateurs de la **figure 14**, la capacité combinée (totale) sera égale à:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3$$

Si C_1 a une valeur de 5 μF, C_2 une valeur de 10 μF et C_3 une valeur de 20 μF, la capacité totale C_T sera égale à:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 = 5 + 10 + 20 = 35\ \mu F$$

23 Condensateurs montés en série

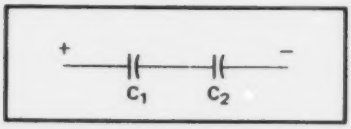


Fig. 15. Si deux condensateurs de même valeur sont montés en série, la capacité totale est égale à la capacité d'un condensateur divisée par le nombre de condensateurs en série. Par exemple, la capacité totale de deux condensateurs ayant une valeur de 12 μF est égale à 12/2 = 6 μF. La formule permettant de déterminer la capacité totale de deux condensateurs en série est la même que celle utilisée pour déterminer la résistance totale de deux résistances en parallèle:

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Lorsque deux condensateurs sont montés *en série*, comme sur la **figure 15**, leur capacité combinée est toujours inférieure à la moindre des capacités individuelles. Si C_1 et C_2 représentent les capacités de deux condensateurs série, leur capacité combinée sera égale à:

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Par exemple, si C_1 a une valeur de 6 μF et C_2 une valeur de 3 μF, la capacité totale sera égale à:

$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{6 \times 3}{6 + 3} = \frac{18}{9} = 2\ \mu F$$

Exercice de contrôle 3

Voici quelques questions qui vont vous permettre de contrôler vos connaissances sur la capacité. Si l'une de vos réponses est fausse, révisez la section citée en référence avant de poursuivre le cours.

Vos réponses

1. Le matériau non conducteur placé entre les plaques d'un condensateur s'appelle (coulomb, diélectrique) _____ .

   1. _____

2. Vrai ou faux? Lorsqu'un circuit électrique comprend un condensateur, les charges électriques traversent celui-ci.

   2. Vrai Faux
   (Encerclez la bonne réponse)

3. Si vous deviez réduire la capacité d'un condensateur à air, vous (rapprocheriez, éloigneriez) _____ les plaques.

   3. _____

4. Des matériaux diélectriques suivants, lequel utiliseriez-vous pour tripler la capacité d'un condensateur à air?
   A. Papier.
   B. Huile.
   C. Caoutchouc.
   D. Verre.

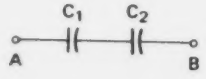
   4. _____

5. Des valeurs de capacité suivantes, quelle est la plus petite?
   A. 0,5 F
   B. 1,0 μF
   C. 80 μF
   D. 100 pf

   5. _____

6. Supposez que vous ayez raccordé un condensateur de 6 μF à un condensateur de 12 μF, selon le montage suivant. La capacité totale mesurée aux bornes *A* et *B*, serait égale à:
   A. 2 μF.
   B. 4 μF.
   C. 18 μF.
   D. 72 μF.

   6. _____



Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 3

1. diélectrique Section 17
2. Faux Section 17, figure 3 (Le condensateur n'est pas un conducteur. Le courant ne circule pas dans le condensateur, mais dans le circuit extérieur.)
3. éloigneriez Section 18
4. C Caoutchouc Section 19, tableau (constante diélectrique = 3,0)
5. D 100 pF Section 21
6. B 4 μF Section 23, figure 15 (Il s'agit d'un montage série, donc:

$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{6 \times 12}{6 + 12}$$

Effets de la capacité sur les circuits à c.a.

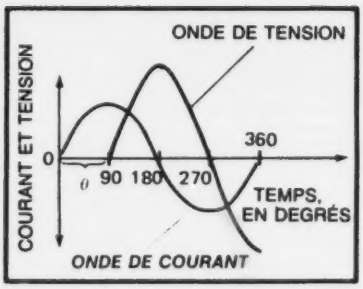


Fig. 16. La réactance capacitive provoque un *retard* de 90° de l'onde de tension sur l'onde de courant. En d'autres termes, le courant est en avance de phase sur la tension. Pour vous en souvenir, pensez au mot *ICE*: le courant *I* dans un condensateur *C* est en avance sur la tension *E*. (Comparez cette illustration à la figure 5 et notez les différents effets provoqués par la capacité et l'inductance.)

24 Réactance capacitive

Dans un circuit à c.a., la capacité provoque une *opposition au flux de courant* et un *retard des ondes de tension* par rapport aux ondes de courant. Ces effets sont montrés sur la **figure 16.** L'opposition au flux de courant provoquée par la capacité correspond à la *réactance capacitive*. Elle se mesure en ohms et est généralement désignée par le symbole X_C.

Lorsque la fréquence est connue, la réactance capacitive peut être déterminée par la formule suivante:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

où: X_C = réactance capacitive, en ohms
π = 3,14, une constante
f = fréquence de la tension appliquée, en hertz
C = capacité du condensateur, en farad

D'après cette formule, plus la capacité d'un condensateur est grande, plus la réactance au courant à une fréquence donnée est faible. Par ailleurs, plus la fréquence est élevée, plus la réactance d'un condensateur ayant une capacité donnée est faible. Si la valeur de la capacité est exprimée en microfarads ou en picofarads, il faut d'abord la convertir en *farads* avant de pouvoir l'utiliser dans la formule de la réactance.

Par exemple, dans un circuit de 1000 Hz, un condensateur de 10 μF, soit 0,0001 F, aurait une réactance capacitive de:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \times 3{,}14 \times 1000 \times 0{,}000\,01}$$
$$= \frac{1}{0{,}0628} = 15{,}9\ \Omega$$

25 Loi d'Ohm pour les circuits capacitifs

Le courant qui circule dans un condensateur est appelé *courant capacitif réactif*, I_C. Dans un circuit capacitif, le courant est *en avance* sur la tension.

Un courant en avance de phase, comme un courant en retard de phase, ne produit aucun travail utile (chaleur ou mouvement mécanique): seul le courant résistif produit un travail utile. Néanmoins, un courant en avance de phase sert à contrecarrer l'effet de l'inductance dans les grands systèmes d'alimentation. Par conséquent, les condensateurs sont installés dans des centrales ou des systèmes de distribution pour augmenter le facteur de puissance, parce que leur courant en avance de phase tend à annuler le courant en retard de phase résultant de charges inductives telles que moteurs, transformateurs et bobines.

Un courant capacitif réactif est également présent dans les lignes de transport d'électricité longue distance. Les conducteurs parallèles de ces lignes agissent comme des plaques de condensateur et produisent une capacité dans le circuit.

On peut calculer le courant dans un circuit sans résistance (mais ayant une réactance capacitive) en appliquant une formule semblable à la loi d'Ohm, à savoir:

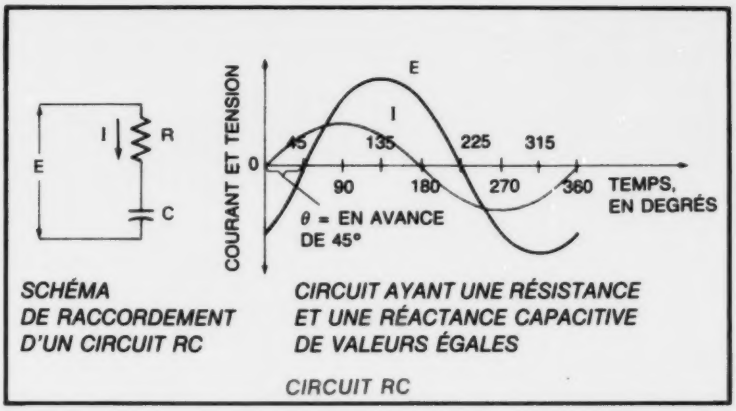
$$I_C = \frac{E}{X_C}$$

où I_C = courant capacitif réactif, en ampères
E = tension appliquée, en volts
X_C = réactance capacitive, en ohms

26 Circuits *RC*

Dans un *circuit purement capacitif*, le courant est en *avance* de 90° sur la tension, comme le montrait la figure 16. Si le circuit contient une résistance (en plus de la réactance capacitive), le déphasage sera compris entre 0° et 90°. Un circuit de ce type est appelé circuit *RC* et se présente comme un circuit ayant une résistance *R* et une capacité en série, comme le montre la **figure 17**.

Fig. 17. Dans un circuit *RC* série, la capacité provoque une avance de l'angle de phase θ. Comparez ces ondes à celles du circuit *RL* représenté à la figure 9. Vous observerez que l'effet de la capacité est *opposé* à celui de l'inductance. Il existe un moyen facile pour se souvenir de cela: *ELI* et *ICE* montrent que *E* est en avance sur *I* dans une inductance *L*, et *I* est en avance sur *E* dans un condensateur *C*.



Dans un circuit *RC* ayant une résistance et une réactance capacitive égales, l'onde de courant est en avance de 45° sur l'onde de tension, *soit* $\theta = 45°$, comme le montre **la figure 17**. Si la résistance est supérieure à la réactance capacitive du circuit, le déphasage θ est inférieur à 45°; si la réactance capacitive est supérieure à la résistance, le déphasage θ est compris entre 45° et 90°.

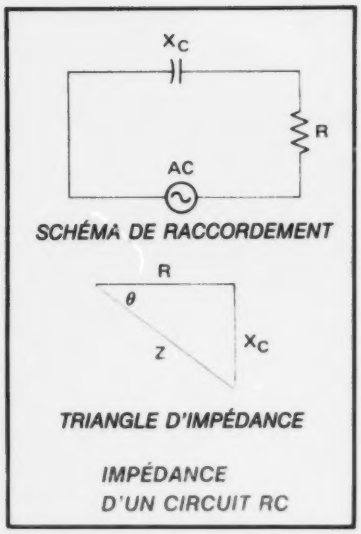


Fig. 18. Les valeurs de *R* et de X_C déterminent le déphasage θ. Si X_C est supérieur à *R*, le courant d'entrée sera en avance sur la tension selon un déphasage compris entre 90° et 45°. Si X_C est égal à *R*, le déphasage est de 45°. Si *R* est supérieur à X_C, le déphasage sera compris entre 45° et 0°.

27 Impédance des circuits *RC* série

L'impédance d'un circuit *RC* série correspond à son opposition totale au passage du courant alternatif, y compris à la résistance et à la réactance capacitive. Lorsqu'un circuit série contient à la fois une résistance et une réactance capacitive, l'impédance *Z* est supérieure à la résistance *R* ou à la réactance X_L prises séparément.

Considérons par exemple le circuit *RC* raccordé à une source de tension alternative représenté sur la **figure 18**. L'impédance *Z* de ce circuit peut être calculée de la même manière que l'impédance *Z* du circuit série *RL* de la figure 8, si ce n'est que l'on utilise la réactance capacitive X_C dans la formule de la règle des carrés au lieu de la réactance inductive X_L. D'après la formule de la règle des carrés, appliquée au triangle d'impédance représenté sur à **figure 18,** l'impédance est égale à:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

où: Z = impédance, en ohms
R = résistance, en ohms
X_C = réactance capacitive, en ohms

28 Types de condensateurs

Les condensateurs sont généralement identifiés d'après le type de diélectrique (matériau isolant) utilisé, ou d'après leur structure physique. Ainsi, un condensateur où l'air est utilisé comme diélectrique est appelé condensateur à air; un condensateur où le mica est utilisé comme diélectrique est appelé condensateur au mica, etc. De la même manière, un condensateur ayant une forme de disque est appelé condensateur plat ou en forme de disque; un condensateur ayant une forme tubulaire est appelé condensateur tubulaire, etc. (fig. 19).

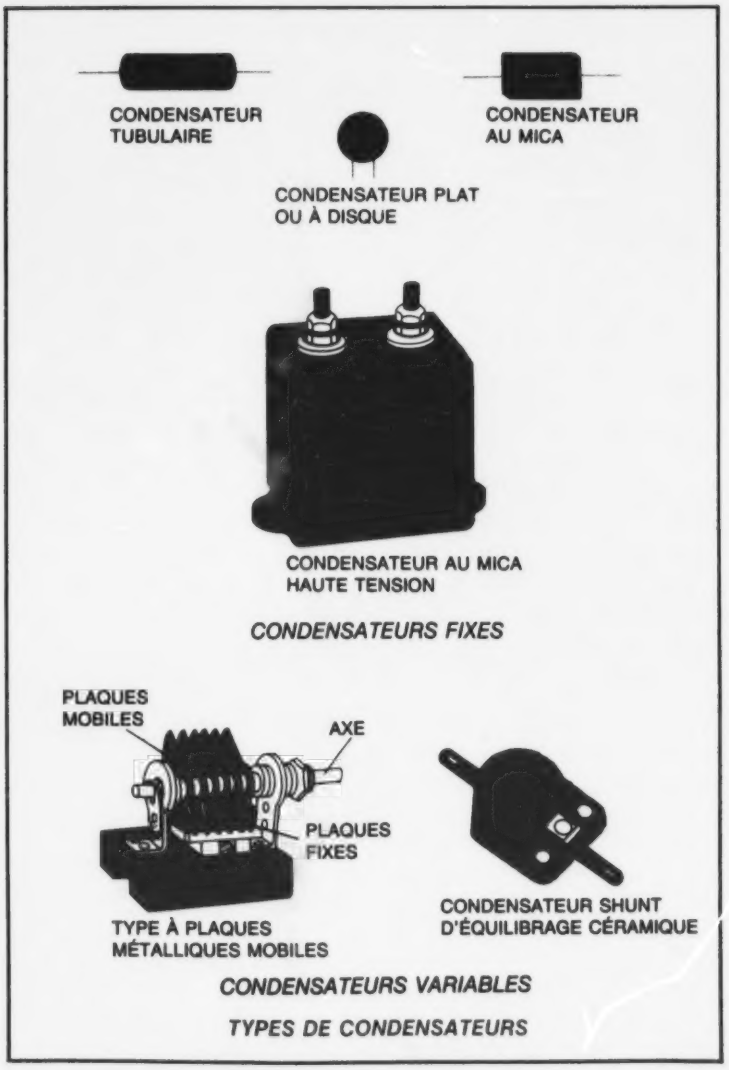


Fig. 19. Les condensateurs peuvent être soit à capacité constante (condensateurs fixes), soit à capacité variable. Les condensateurs variables sont utilisés pour les accords («équilibrages»), lorsqu'il est nécessaire d'effectuer des réglages de précision de la capacité d'un circuit.

Ces deux types de condensateurs, qui sont identifiés d'après leur diélectrique et leur forme, peuvent être également groupés en deux catégories: fixes ou variables. Un *condensateur fixe* a une capacité constante, alors que la capacité d'un *condensateur variable* peut changer. Un condensateur variable est muni d'un jeu de plaques fixes et d'un jeu de plaques mobiles, montées sur un axe. Quand l'axe tourne, les plaques mobiles s'intercalent entre les plaques fixes, ce qui modifie la capacité du condensateur. Ces condensateurs sont utilisés pour les appareils de mesure de fréquence et pour les récepteurs de radio et de télévision.

29 Identification des condensateurs

La capacité, la tolérance, la tension de service c.c. et le coefficient de température sont imprimés sur la plupart des condensateurs. Sur certains condensateurs, ces informations sont données sous forme de points ou de bandes codés par couleur. Cependant, contrairement aux résistances, tous les condensateurs ne sont pas codés par couleur selon une méthode unique. Les condensateurs destinés à des applications industrielles sont codés d'après les normes de l'Electronic Industries Association (EIA); ceux destinés à des applications militaires sont codés d'après les normes militaires (par exemple, la norme américaine MIL-C-5A).

Des méthodes différentes de codage par couleur sont utilisées pour les condensateurs au papier, au mica et en céramique. Les codes de couleur sont généralement expliqués dans le catalogue du fabricant. En dehors des valeurs de capacité, ces catalogues spécifient également la tolérance, la tension de service c.c. et le coefficient de température pour chaque valeur de capacité. Chaque terme est brièvement défini ainsi:

La *tolérance* est le facteur selon lequel la valeur réelle du condensateur peut dévier par rapport à la valeur indiquée.

La *tension de service c.c.* d'un condensateur est la tension maximale à laquelle le condensateur peut fonctionner pendant une période prolongée, sans risque de rupture du diélectrique.

Le *coefficient de température* indique dans quelle mesure la capacité varie en fonction de la température.

30 Condensateurs électrolytiques multiples

La **figure 20** représente un condensateur électrolytique multiple. Dans la partie supérieure de la figure, à gauche des capacités nominales, on trouve une série de symboles : un demi-cercle, un carré, un triangle et une ligne droite. Dans la partie inférieure de la figure, ces mêmes symboles sont perforés dans le disque isolant à côté de la cosse à souder correspondante. L'absence de symbole sur la cosse supérieure gauche signifie que cette cosse a la même valeur que celle indiquée par la ligne droite du schéma supérieur de la figure, soit 30 MFD, et que la tension nominale est de 300 *VDC*.

lettres *MFD* figurant sur l'enveloppe du condensateur sont l'abréviation de «microfarad»: cette abréviation est plus couramment utilisée par les fabricants que le symbole μF. Les lettres *VDC* signifient «tension de service c.c.» (de l'appareil). Les lettres *CAN COM NEG* indiquent que l'enveloppe métallique (CAN) du condensateur est la borne *COM*mune *NÉG*ative des quatre composants du condensateur.

Fig. 20. Les cosses à souder des différentes plaques positives du condensateur sont isolées de l'enveloppe métallique et des cosses de terre par un disque isolant. La capacité et la tension nominales des différentes sections sont imprimées sur l'enveloppe métallique. Certains condensateurs sous enveloppe métallique sont recouverts d'un manchon en plastique sur lequel sont imprimées les valeurs.

31 Facteur de dissipation

Dans un condensateur, le coefficient Q de qualité, comme le coefficient Q d'une inductance, indique dans quelle mesure le condensateur se rapproche du fonctionnement idéal, c'est-à-dire de l'absence de pertes. Dans un condensateur, Q est égal au rapport de la réactance capacitive X_C sur la résistance série R (qui représente les pertes). Ainsi:

$$Q = \frac{Xc}{R} = \frac{1}{2\pi fCR}$$

Dans la majorité des cas, il est plus facile de réduire les pertes dans un condensateur réel que dans une bobine réelle. Les valeurs de Q pour les condensateurs sont souvent supérieures aux valeurs de Q pour les inductances. Il faut cependant noter que la valeur Q d'un condensateur, comme la valeur Q d'une inductance, varie en fonction de la fréquence appliquée.

Dans un condensateur, on utilise plus couramment la caractéristique appelée *facteur de dissipation*, à la place de Q. Le fac-

teur de dissipation, désigné par le symbole D, est égal à $1/Q$ et est souvent exprimé en pourcentage. Ainsi, on peut déterminer le pourcentage de pertes d'un condensateur d'après la formule suivante:

$$D = \frac{1}{Q} = \frac{R}{X_C} = 2\pi fCR \times 100\%$$

32 Retard des circuits capacitifs

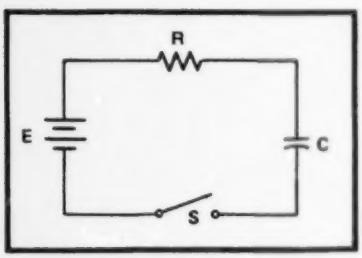


Fig. 21. Lorsqu'une tension est instantanément appliquée à un circuit *RC*, un certain retard se produit avant que le condensateur ne soit complètement chargé, comme dans un circuit *RL*.

Lorsqu'un courant continu est appliqué à un condensateur, comme sur la **figure 21**, un *retard se produit* avant que le condensateur n'atteigne sa pleine charge. Ce *retard* se produit parce que le condensateur et son circuit offrent toujours une certaine résistance.

Puisqu'un condensateur met un temps assez long pour atteindre la valeur de la tension appliquée, il est plus facile d'utiliser des constantes de temps lorsqu'on parle de charge ou de décharge d'un condensateur.

La *constante de temps* est déterminée d'après la formule suivante:

$$\tau = RC$$

où: τ = temps, en secondes
R = résistance du circuit, en ohms
C = capacité du condensateur, en farads

Par exemple, si C est égal à 100 μF (0,0001 F) et R à 1000 Ω, la constante de temps sera égale à 0,0001 x 1000, soit 0,1 s.

Exercice de contrôle 4

Vous allez maintenant faire une pause pendant quelques minutes et revoir quelques points-clés avant de répondre au questionnaire personnel. Comparez vos réponses aux nôtres et révisez, au besoin, les notions qui ne vous sont pas claires.

Vos réponses

1. Si vous mesurez la valeur de la réactance capacitive d'un condensateur à des fréquences de 10 Hz et de 100 Hz, vous constatez que la valeur obtenue à 10 Hz est (supérieure, inférieure) _____ à la valeur obtenue à 100 Hz.

1. _____

2. Dans un circuit capacitif, le courant est (en retard, en avance) _____ sur la tension.

2. _____

3. Expliquez brièvement pourquoi on installe des condensateurs dans le réseau de distribution d'une usine pour augmenter le facteur de puissance.

3. _____

4. Si vous devez diminuer le rapport de déphasage θ d'un circuit *RC*, vous devez (augmenter, diminuer) _____ la résistance.

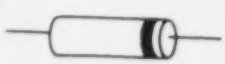
4. _____

5. Parmi les condensateurs représentés ci-dessous, lequel est un condensateur tubulaire?

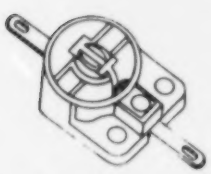
5. _____

A.

C.



B.



D.

6. La capacité, la tension de service c.c., la tolérance et le coefficient de température sont souvent indiqués sur les condensateurs par des codes de couleur sous forme de _____ ou de _____.

6. _____

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 4

1. supérieure — Section 24
2. en avance — Sections 24-25, figure 16
3. Le courant d'un condensateur (en avance de phase) annule le courant inducteur (en retard de phase) produit par des charges inductives telles que les moteurs, les transformateurs et les réactances. — Section 25
4. augmenter — Section 26
5. C — Section 28, figure 19
6. points, bandes — Section 29

Examen personnel

Lisez attentivement chacune des questions suivantes et assurez-vous que vous en comprenez bien le sens. Chaque question est suivie de quatre mots ou groupes de mots dont un seul est correct. Faites un X sur la lettre correspondant à votre réponse.

1. Une variation du couplage magnétique est provoquée par une variation du courant acheminé par la bobine. La variation est due à:

   A. l'induction mutuelle.
   B. l'auto-induction.
   C. la résistance.
   D. la capacité.

2. On peut augmenter la valeur de l'inductance d'une bobine multicouche en:

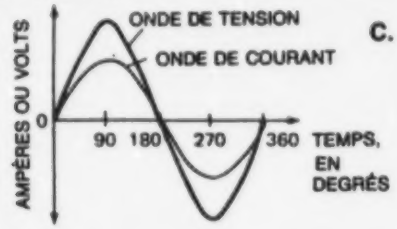
   A. augmentant sa résistance.
   B. ajoutant des couches supplémentaires.
   C. utilisant un noyau solide en plastique.
   D. enlevant des spires.

3. Lequel des symboles suivants désigne l'unité de mesure de l'inductance?

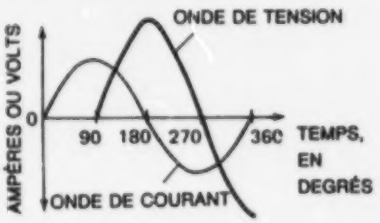
   A. Ω
   B. A
   C. H
   D. F

4. Des formes d'ondes suivantes, laquelle indique l'effet de l'inductance dans un circuit à c.a.?

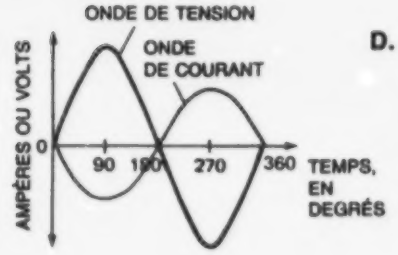
A.



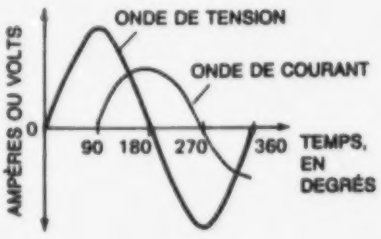
C.



B.



D.



5. Lequel des symboles suivants représente l'opposition totale au flux de courant alternatif dans un circuit série RL?

   A. R
   B. X_L
   C. Z
   D. C

6. La constante de temps d'un circuit série RL composé d'une bobine de 15 H et d'une résistance de 5 Ω est égale à:

   A. 3 s
   B. 10 s
   C. 20 s
   D. 60 s

7. Des effets décrits ci-dessous, quel est celui que vous constateriez si vous augmentiez la tension aux bornes d'un condensateur?

   A. La charge pouvant être emmagasinée par le condensateur diminuerait.
   B. La valeur de la capacité resterait constante.
   C. La valeur de la constante diélectrique serait réduite.
   D. La rigidité diélectrique augmenterait.

8. Votre contremaître vous demande de raccorder en parallèle deux condensateurs, C_1 = 18 μF et C_2 = 6 μF. La capacité combinée totale du condensateur sera de:

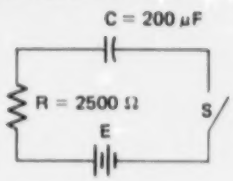
   A. 3 μF.
   B. 12 μF.
   C. 24 μF.
   D. 104 μF.

9. Lorsque vous calculez la réactance capacitive, vous devez vous souvenir que la valeur dépend à la fois:

   A. de la fréquence et de la capacité.
   B. de la fréquence et de la tension.
   C. l'inductance et de la tension.
   D. l'inductance et de la capacité.

10. Dans le circuit représenté ci-dessous, combien de temps faut-il pour que la charge du condensateur atteigne 63% de sa valeur maximale après fermeture de l'interrupteur S?

    A. 0,08 s
    B. 0,5 s
    C. 2,25 s
    D. 4,5 s



Les réponses sont données à la page 334.

Inductance et capacité

AF0204

(Lexiques)

Français	Anglais
À induction propre	Self-inducted
Admission du courant	Current in
Auto-induction	Self induction
Bobine à accord par noyau plongeur	Slug-tuned coil
Bobine à air	Air-core coil
Bobine à noyau de fer	Iron-core coil
Bobine à prises	Tapped coil
Bobine d'accord	Tuning coil
Bobine d'antenne	Antenna coil
Bobine d'arrêt	Choke coil
Bobine d'inductance	Inductance coil
Bobine de charge	Loading coil
Bobine oscillatrice	Oscillator coil
Codage par couleurs	Color-coding
Coefficient de qualité	Figure of merit
Coefficient de surtension	Q factor
Condensateur à disque	Disk capacitor
Condensateur au mica	Mica capacitor
Condensateur céramique	Ceramic capacitor
Condensateur multiple	Multiunit capacitor
Condensateur shunt d'équilibrage	Trimmer
Condensateur tubulaire	Tubular capacitor
Conducteur bobiné	Coiled conductor
Conducteur sous tension	Current carrying conductor
Contact coulissant	Sliding contact
Contact mobile	Movable contact
Cosse à souder	Solder lug
Couplage inductif	Flux linkage
Courant de magnétisation	Magnetizing current
Courant en avance de phase	Leading current
Courant en retard de phase	Lagging current
Déphasage	Phase shift
Déphasage (angle de phase)	Phase angle
Déphasage	Phase difference
F.É.M. (force électromotrice)	EMF (electromotive)
Facteur de puissance	Power factor
Force contre-électromotrice	Counter electromotive force
Inductance	Inductor
Induction mutuelle	Mutual induction
Intensité du champ magnétique	Strenght of magnetic field
Matériau magnétique	Core material
Monocouche	Single-layer
Multicouche	Multi-layer
Noyau en ferrite	Ferrite core

Anglais	Français
Air-core coil	Bobine à air
Antenna coil	Bobine d'antenne
Ceramic capacitor	Condensateur céramique
Choke coil	Bobine d'arrêt
Coiled conductor	Conducteur bobiné
Color-coding	Codage par couleurs
Core material	Matériau magnétique
Counter electromotive force	Force contre-électromotrice
Current carrying conductor	Conducteur sous tension
Current change	Variation de courant
Current in	Admission du courant
Dielectric strenght	Rigidité diélectrique
Disk capacitor	Condensateur à disque
EMF (electromotive)	F.É.M. (force électromotrice)
Ferrite core	Noyau en ferrite
Figure of merit	Coefficient de qualité
Flux linkage	Couplage inductif
Heating resistor	Résistance de chauffage
Inductance coil	Bobine d'inductance
Iron-core coil	Bobine à noyau de fer
Inductor	Inductance
Lagging current	Courant en retard de phase
Leading current	Courant en avance de phase
Loading coil	Bobine de charge
Magnetizing current	Courant de magnétisation
Mica capacitor	Condensateur au mica
Movable contact	Contact mobile
Multiunit capacitor	Condensateur multiple
Multi-layer	Multicouche
Mutual induction	Induction mutuelle
Oscillator coil	Bobine oscillatrice
Phase angle	Déphasage (angle de phase)
Phase difference	Déphasage (angle de phase)
Phase shift	Déphasage
Plate	Plaque
Power factor	Facteur de puissance
Q factor	Coefficient de surtension
Right triangle	Triangle rectangle
Self induction	Auto-induction
Self-inducted	À induction propre
Single-layer	Monocouche
Sliding contact	Contact coulissant
Slug-tuned coil	Bobine à accord par noyau plongeur
Solder lug	Cosse à souder
Strenght of magnetic field	Intensité du champ magnétique
Tapped coil	Bobine à prises

Français	Anglais
Noyau réglable	Variable core
Plaque	Plate
Puissance utile	Useful power
Résistance de chauffage	Heating resistor
Rigidité diélectrique	Dielectric strenght
Tension de service	Working voltage
Triangle rectangle	Right triangle
Variation de courant	Current change

Anglais	Français
Trimmer	Condensateur shunt d'équilibrage
Tubular capacitor	Condensateur tubulaire
Tuning coil	Bobine d'accord
Useful power	Puissance utile
Variable core	Noyau réglable
Working voltage	Tension de service

Circuits à courant alternatif

AF0205

Circuits à courant alternatif

Objectifs d'enseignement

Les systèmes électriques et électroniques sont équipés de circuits à c.c. (courant continu) et à c.a. (courant alternatif). Dans les circuits à c.a., deux éléments, l'inductance et la capacité, jouent un rôle majeur dans le bon fonctionnement des systèmes et des équipements électriques et électroniques. En tant qu'électricien d'entretien d'usine, vous devez savoir comment ces éléments (ainsi que la résistance) interagissent dans les circuits à c.a. L'objectif de ce cours est précisément de vous l'apprendre.

À la fin du présent cours, vous devriez être en mesure:

- *D'expliquer les effets de la résistance, de l'inductance et de la capacité dans les circuits à c.a.*
- *De décrire les principes élémentaires de fonctionnement des circuits RLC montés en série et en parallèle.*
- *De comparer les propriétés des circuits LC série et des circuits LC parallèle.*
- *De décrire les applications de base des circuits résonants.*

Table des matières

Circuits à courant alternatif montés en série

Circuits résistifs montés en série 187
Circuits inductifs montés en série 188
Circuits capacitifs montés en série 189
Circuits *RL*, *RC* et *RLC* 190
Montage en série 191
Impédance dans les circuits *RLC* montés en série 192
Circuits *LC* 192
Circuits *LC* montés en série 193
Exercice de contrôle 1 195

Circuits à courant alternatif montés en parallèle

Circuits *RLC* parallèle 196
Courants dans un circuit *RLC* parallèle 196
Circuits *LC* parallèle 198
Courants et tensions dans les circuits bouchons 198
Résistance et coefficient de surtension Q des circuits résonants 199
Exercice de contrôle 2 200

Applications des circuits résonants

Circuits de filtrage 201
Circuits de filtrage *RL* 201
Circuits de filtrage *RC* 202
Circuit à filtre passe-bande et circuit à filtre éliminateur de bande 202
Circuits *RL* et *RC* parallèle 204
Exercice de contrôle 3 205

Examen personnel 206

Lexiques 208

Circuits à courant alternatif montés en série

1 Circuits résistifs montés en série

Un circuit-série est constitué par une source de tension (batterie ou générateur) et par des résistances, des condensateurs, des bobines d'inductance, ou toute combinaison en série de ces composants. Nous allons maintenant examiner les trois composants électriques de base, à savoir les résistances, les condensateurs et les bobines, et leur effet sur les circuits à c.a. (courant alternatif) et à c.c. (courant continu) montés en série.

Examinons d'abord la résistance. Le circuit représenté à la **figure 1** comprend une source de tension E et la résistance R. (On peut choisir soit une source de c.a., soit une source de c.c.). Puisque le circuit comprend uniquement une source de courant et une résistance, on l'appelle circuit résistif. La résistance, comme son nom l'indique, résiste au flux de courant et le limite à une valeur donnée. **La résistance limite le flux de courant qu'il s'agisse d'une source de c.c., telle qu'une batterie, ou d'une autre source de c.a., telle qu'un générateur.**

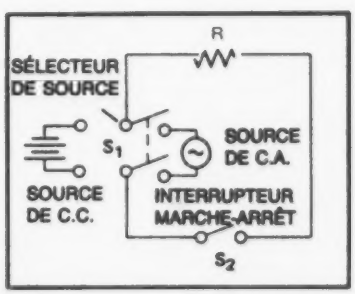


Fig. 1. Dans ce circuit résistif, un interrupteur bipolaire à deux directions sert à sélectionner la source de courant. Que la source d'alimentation du circuit soit une batterie ou une source de c.a., il ne se produit aucun déphasage significatif entre la tension appliquée et le courant qui circule dans le circuit.

Le rapport entre la tension E, la valeur de la résistance R et le courant qui circule dans le circuit résistif en série se calcule d'après la loi d'Ohm, à savoir $E = I \times R$. En appliquant cette loi simple, vous pouvez déterminer la valeur de l'une quelconque des trois caractéristiques d'un circuit (tension, courant ou résistance), à condition de connaître la valeur des deux autres. Par exemple, si vous connaissez la tension et la résistance, vous pouvez déterminer le courant, en divisant tout simplement la tension par la résistance, soit

$$I = \frac{E}{R}.$$

De même, si vous connaissez la tension et le courant, vous pouvez calculer la résistance en divisant la tension par le courant, soit

$$I = \frac{E}{I}.$$

Dans un circuit résistif, que la source de tension soit alternative ou continue, le flux de courant dans le circuit atteint instantanément sa valeur maximale, sans aucun retard, dès que l'on ferme l'interrupteur MARCHE-ARRÊT S_2. De même aucun

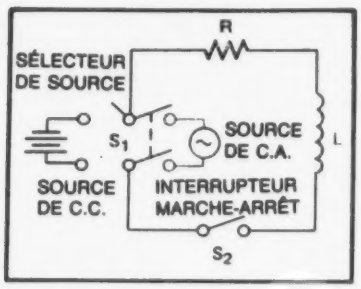


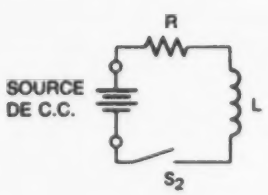
Fig. 2. Dans ce circuit à c.c. *RL*, la valeur finale en régime permanent est déterminée par la tension de la batterie *E* et par la résistance *R*. Dans un circuit inductif, la constante de temps est égale à $\tau = \frac{L}{R}$. Si la source est une source de c.a., la réactance inductive X_L provoque un *retard* du courant sur la tension (la réactance inductive augmente en même temps que la fréquence de la source de c.a.).

retard ne se produit avant que le courant ne s'annule lorsqu'on ouvre l'interrupteur S_2.

Le circuit purement résistif est le circuit le plus simple que vous rencontrerez. En fait, vous aurez rarement l'occasion de travailler sur de tels circuits, car même un simple morceau de fil a une certaine réactance. Comme vous pouvez le constater, les circuits à c.a. et à c.c. montés en série, comprenant uniquement une résistance, se comportent de manière très similaire.

2 Circuits inductifs montés en série

Voyons maintenant l'effet que produit l'ajout d'une bobine (inductance) dans un circuit simple comme celui représenté à la **figure 2**. L'inductance introduite dans le circuit par la bobine aura un effet différent de l'effet produit par la résistance. La première s'oppose à toute variation du courant. En d'autres termes, l'inductance (désignée par la lettre *L*) n'est autre que la propriété d'une bobine à s'opposer à une variation du courant dans le circuit. Ceci revient à dire que, lorsque le courant augmente, l'inductance réagit pour s'opposer à cette hausse. De même, lorsque le courant diminue, l'inductance réagit pour s'opposer à cette baisse de courant. Cette opposition exercée par la bobine à une variation du courant est appelée réactance inductive. Plus un circuit série contient de bobines, plus la réactance inductive est grande.

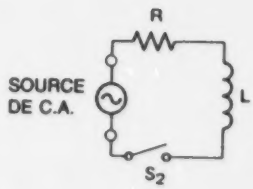


Examinons tout d'abord l'effet de la bobine *L* sur le circuit série à c.c. représenté à la **figure 2**, dont la source est une batterie. Supposons qu'il s'agisse d'une bobine idéale ou parfaite. Cela signifie que la bobine ne présente qu'une inductance et aucune résistance. Lorsque l'interrupteur S_2 est maintenu en position de MARCHE pendant un certain temps, le courant demeure constant ou inchangé. Ce courant constant est uniquement déterminé par la résistance *R*, puisque nous savons que l'inductance ne s'oppose qu'à une *variation du courant* et non à un courant constant.

Cependant, il existe deux conditions dans lesquelles la bobine influence un circuit série à c.c.: lorsque l'interrupteur S_2 passe de la position ARRÊT à la position MARCHE et lorsqu'il passe de la position MARCHE à la position ARRÊT. À ces deux moments, on passe d'une absence de flux à un courant constant, ou d'un courant constant à une absence de flux. Puisque la bobine d'inductance s'oppose à toute variation du courant, ce dernier change lentement au lieu de passer instantanément d'un niveau à un autre.

Dans un circuit inductif, combien de temps faut-il pour que le courant passe d'un niveau d'intensité à un autre? La *constante de temps* τ, en secondes, d'un circuit inductif est définie comme étant égale à l'inductance L divisée par la résistance R, soit $\tau = \frac{L}{R}$. Il faut cinq constantes de temps, soit 5 t, pour que le courant passe d'une intensité fixe à une autre intensité fixe.

Voyons maintenant comment une bobine influe sur le même circuit de la figure 2 lorsque l'alimentation est fournie par une source de c.a. Vous vous souvenez qu'avec une source de c.a., la tension d'alimentation varie constamment. Donc le courant produit dans le circuit varie aussi constamment. Puisque le courant varie constamment, la bobine a un effet sur ce dernier lorsque l'interrupteur S_2 est mis sur MARCHE. La réactance inductive de la bobine essaie d'empêcher toute variation du courant. Cela se traduit par un retard ou déphasage du courant par rapport à la tension. (Vous apprendrez un peu plus loin les notions de courant en retard et en avance (de phase) sur la tension.)



Comme vous l'avez déjà appris, l'opposition à une variation du courant est appelée réactance inductive. La réactance inductive X_L dépend de l'inductance L d'une bobine et de la fréquence f de la source de tension alternative. Ces grandeurs peuvent être mises en relation dans la formule suivante:

$$X_L = 2\pi fL$$

où: X_L = réactance inductive, en ohms
(π est la lettre grecque pi) = 3,14, une constante
f = fréquence, en hertz
L = inductance, en henrys

Ainsi, dans un circuit purement inductif, c'est-à-dire sans résistance, la loi d'Ohm peut s'appliquer de la manière suivante:

$$E = X_L I$$

3 Circuits capacitifs montés en série

Nous allons maintenant étudier l'effet du condensateur sur un circuit série. Le condensateur C, dans le circuit représenté à la **figure 3**, provoque également une variation du courant, mais d'une manière un peu différente de la bobine d'inductance. Alors que l'inductance s'oppose à toute variation du courant, la capacité s'oppose à toute variation de la tension. L'opposition exercée par le condensateur est appelée *réactance capacitive*.

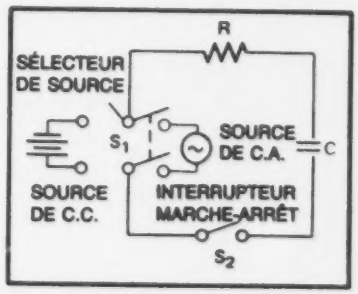
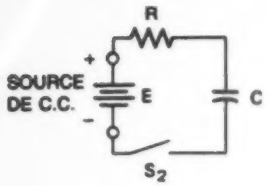


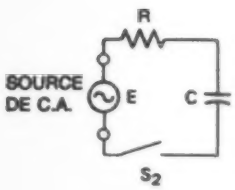
Fig. 3. Dans un circuit à c.c. *RC*, la tension produite aux bornes du condensateur s'accumule graduellement pour atteindre le niveau de la tension appliquée. Dans un circuit capacitif, la constante de temps est $\tau = RC$. Si l'alimentation est fournie par une source de c.a., la réactance capacitive X_C provoque un *retard* de la tension sur le courant. La réactance capacitive diminue au fur et à mesure qu'augmente la fréquence de la source de c.a.



Examinons de nouveau un circuit à c.c., pour comprendre, tout d'abord, comment un condensateur influe sur la tension et le courant du circuit. Souvenez-vous qu'un condensateur se présente sous la forme d'un circuit ouvert lorsque la tension appliquée est constante. Dans ce circuit série à c.c., le condensateur n'a un effet que lorsque l'interrupteur S_2 MARCHE-ARRÊT est actionné. Par exemple, si l'interrupteur S_2 est fermé, le condensateur essaie de se charger au niveau de la tension E de la batterie. Puisque le condensateur s'oppose à cette variation de la tension dans le circuit, il lui faudra un certain temps pour se charger.

Une constante de temps τ est également associée aux circuits capacitifs et elle est définie comme étant le produit de la résistance et de la capacité, soit $\tau = RC$, en secondes. Il faut cinq constantes de temps, soit 5 τ, pour qu'un condensateur passe d'un niveau de tension constante à un autre niveau.

Voyons maintenant comment le condensateur réagit lorsqu'il est utilisé dans un circuit alimenté par une source de tension alternative. Puisque les variations de la tension sont opposées, ou retardées, la tension est en *retard* sur le courant. Cela revient à dire que le courant est en avance sur la tension. La valeur de l'opposition, appelée réactance capacitive, est désignée par le symbole X_C. Voici la formule de la réactance capacitive:



$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

où: X_C = réactance capacitive, en ohms
C = capacité, en farads

Ainsi, dans un circuit purement capacitif, c'est-à-dire un circuit sans résistance, la loi d'Ohm peut s'appliquer ainsi:

$$E = X_C I$$

4 Circuits *RL*, *RC* et *RLC*

Les circuits qui comprennent à la fois une résistance et une réactance inductive sont appelés circuits *RL*; de même, un circuit comprenant à la fois une résistance et une réactance capacitive est appelé circuit *RC*. Un circuit qui comprend une résistance et les deux types de réactance est un circuit *RLC*. (Pour simplifier, on utilise souvent

les symboles *RL*, *RC* et *RLC* afin d'indiquer les différents types de circuits réactifs à c.a.)

Dans un circuit *RLC* série, l'opposition totale au flux de courant est égale à la combinaison de la résistance et des réactances et est appelée impédance. L'*impédance* est désignée par la lettre *Z*.

5 Montage en série

Lorsque des appareils électriques sont montés en série, comme à la figure 4, le courant ne peut circuler que le long d'un seul chemin. La chute de tension aux bornes d'un appareil dépend de la résistance et de la réactance de l'appareil, c'est-à-dire de l'opposition au flux de courant.

Lorsque le circuit série représenté sur la figure 4 est raccordé à une source de tension alternative, le courant circule de la borne 1 pour traverser la résistance *R* et l'inductance *L*; il charge le condensateur *C* et revient à la borne 2. Pendant la deuxième moitié du cycle, le sens du courant est inversé, alors que le courant se déplace tout le long du même chemin. Puisqu'un circuit, comme celui représenté sur la figure 4, comprend des composants qui provoquent une «réactance au courant», on dit que le courant est «déphasé» par rapport à la tension. Il est important de déterminer si le courant est en avance ou en retard sur la tension et l'importance de la différence de phase (déphasage), couramment appelée angle de phase θ (comme la lettre grecque thêta), entre la tension totale et le courant total dans le circuit. Pour déterminer ces valeurs, il est nécessaire de déterminer l'opposition totale au flux de courant dans les circuits à c.a. série.

Pour déterminer si le courant ou la tension sont en avance ou en retard dans un circuit réactif, vous devez simplement vous souvenir de ce mot-clé:

ELI ICE

Dans le groupe de lettres *ELI*, *L* est le symbole de l'inductance. Puisque le *E* précède (est en avance sur) le *I*, la tension est en avance sur le courant (ou le courant est en retard sur la tension) dans un circuit inductif.

Dans le groupe de lettre *ICE*, C est le symbole de la capacité et, ici, le *I* précède le *E*. Donc, dans un circuit capacitif, le courant est en avance sur la tension (la tension est en retard sur le courant).

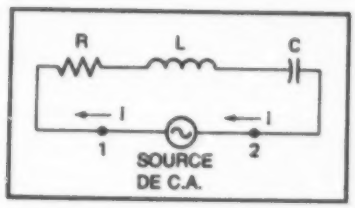


Fig. 4. Dans un circuit série, le même courant I circule dans le circuit mais provoque des chutes de tension différentes aux bornes de chacun des composants. La chute de tension dépend des résistances ou des réactances respectives de chaque composant.

LE COURANT EST EN RETARD
SUR LA TENSION
LA TENSION EST EN AVANCE
SUR LE COURANT
CIRCUIT INDUCTIF

LA TENSION EST EN RETARD
SUR LE COURANT
LE COURANT EST EN AVANCE
SUR LA TENSION
CIRCUIT CAPACITIF

6 Impédance dans les circuits *RLC* montés en série

Dans les circuits résistifs à c.a. ou c.c., *seule la résistance* doit être prise en compte pour calculer le flux de courant et les chutes de tension dans le circuit. L'opposition totale au flux de courant dans un circuit résistif série correspond à la somme de toutes les résistances individuelles associées au circuit. Dans un circuit réactif à c.a., l'opposition totale au flux de courant est appelée *impédance* Z. Dans un circuit *RLC* à c.a. série, l'impédance s'obtient selon la formule suivante:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Les effets de X_L et de X_C sont opposés. Cela veut dire que X_L provoque un retard du courant sur la tension, alors que X_C provoque une avance du courant sur la tension. Si la réactance X_L est supérieure à X_C, la réactance nette du circuit *RLC* à c.a. série est inductive et le circuit se comporte comme un circuit inductif. Ce qui veut dire que le courant est en retard sur la tension.

Si X_C est supérieure à X_L, la réactance nette du circuit *RLC* à c.a. série est capacitive et le circuit se comporte comme un circuit capacitif; ce qui veut dire que le courant est en avance sur la tension.

Cependant, si X_L est égale à X_C, les deux réactances s'annulent (puisque leurs effets sont exactement opposés). Donc, le circuit *RLC* à c.a. série n'a aucune composante réactive et se comporte comme un circuit purement résistif où le courant et la tension sont en phase. Dans ce cas, l'impédance, c'est-à-dire l'opposition totale au courant alternatif, correspond tout simplement à la résistance, soit $Z = R$.

7 Circuits *LC*

Les circuits qui comprennent seulement une inductance et une capacité sont appelés circuits *LC*. Ces circuits sont particulièrement importants en raison d'un effet appelé *résonance*, qui se produit à une certaine fréquence appelée fréquence de *résonance*. Une résonance se produit lorsque la réactance inductive X_L et la réactance capacitive X_C sont égales.

La fréquence de résonance pour une combinaison donnée d'inductance et de capacité peut être déterminée d'après la formule suivante:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

où: f_r = fréquence de résonance, en hertz
π = 3,14, constante universelle
L = inductance, en henrys
C = capacité, en farads

8 Circuits *LC* montés en série

Un circuit *LC* série est représenté à la **figure 5**. La flèche verticale qui se trouve à droite du circuit correspond à une augmentation de la fréquence.

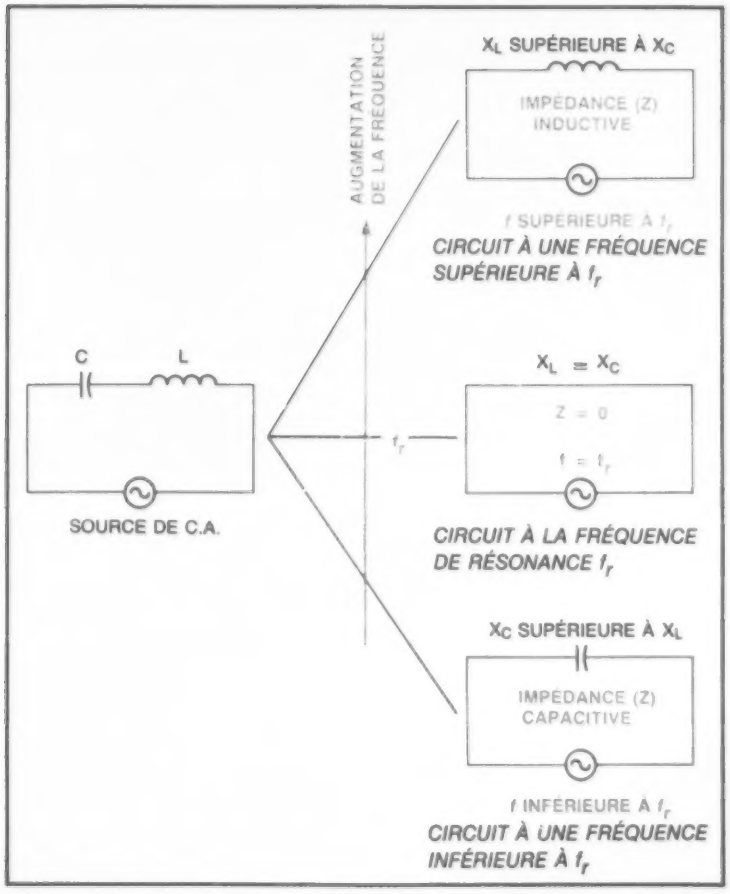


Fig. 5. À la fréquence de résonance, les réactances du circuit *LC* s'annulent et le courant n'est limité que par la résistance des composants. Cependant, puisque la résistance est très faible, le circuit résonant est généralement considéré comme n'ayant que des composants *L* et *C*.

Les circuits résonants sont couramment utilisés dans les équipements électroniques et de télécommunications pour la sélection des fréquences et leurs caractéristiques d'accord.

À des fréquences inférieures à la fréquence de résonance f_r, la réactance capacitive X_C est supérieure à la réactance inductive X_L. Le circuit se comporte comme s'il ne contenait qu'un condensateur monté en série avec la source de tension alternative (ou source du signal), comme le montre la partie inférieure du schéma. À la fréquence de résonance f_r du circuit LC, la réactance inductive de la bobine est égale à la réactance capacitive du condensateur. Ainsi, à la fréquence de résonance, les deux réactances s'annulent et l'opposition nette, ou impédance *Z*, du circuit *LC* aux signaux est nulle comme le montre le centre du schéma. Le circuit agit comme un *court-circuit*.

À des fréquences supérieures à la fréquence de résonance, la réactance inductive est supérieure à la réactance capacitive et le circuit se comporte comme s'il ne contenait qu'une bobine en série avec la source de c.a., comme le montre le schéma supérieur.

Exercice de contrôle 1

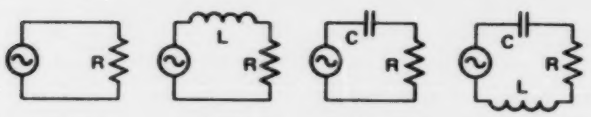
Vous allez maintenant faire une petite pause pour vérifier si vous comprenez bien les notions de base sur les circuits à c.a. série. Lorsque vous aurez répondu à toutes les questions, comparez vos réponses aux nôtres et, au besoin, révisez les sections citées en référence.

Vos réponses

1. Dans un circuit à c.a. *RL*, c.a., le courant est (en avance, en retard) _____ sur la tension. — 1. _____

2. Le courant est (en avance, en retard) _____ sur la tension dans un circuit *RC* à c.a. — 2. _____

Dans l'espace réservé à la colonne de droite, inscrivez le n° du circuit correspondant à la description donnée par l'une des phrases suivantes.



N° 1 N° 2 N° 3 N° 4

3. *a.* L'impédance du circuit n'est pas modifiée par une variation de fréquence.
   b. La réactance du circuit ne diminue que lorsque la fréquence augmente.
   c. L'impédance du circuit n'est égale à la résistance qu'à la fréquence de résonance.
   d. La réactance du circuit n'augmente que lorsque la fréquence augmente.

3. *a.* Circuit n° _____
   b. Circuit n° _____
   c. Circuit n° _____
   d. Circuit n° _____

4. Dans un circuit *LC*, la fréquence à laquelle la réactance inductive est égale à la réactance capacitive est appelée fréquence _____ . — 4. _____

5. Dans un circuit *LC*, si la valeur de X_L est supérieure à celle de X_C, le circuit agit comme un(e) (condensateur, bobine) monté(e) _____ en série avec la source de c.a. — 5. _____

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 1

1. en retard — Section 2, figure 2
2. en avance — Section 3, figure 3
3. *a.* N° 1 — Section 1, figure 1
   b. N° 3 — Section 3, figure 3
   c. N° 4 — Section 6, figure 4
   d. N° 2 — Section 2, figure 2
4. résonance — Section 7
5. Bobine — Section 8

Circuits à courant alternatif montés en parallèle

9 Circuits *RLC* parallèle

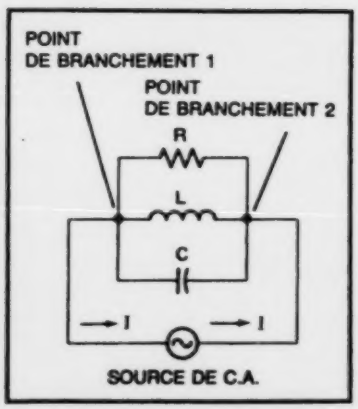


Fig. 6. Dans un circuit monté en parallèle, le même courant *I* s'éloigne de la source de c.a. et y retourne (selon les indications des flèches), bien qu'il quitte le point de branchement 1 et revient au point de branchement 2. La tension aux bornes de chaque branche est égale à la tension de la source de c.a.

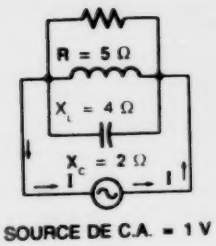
Dans un circuit parallèle, le courant se divise entre les différentes branches. Chaque branche transporte une partie du courant total en fonction de sa résistance *R*, de sa réactance *X*, ou des deux. Cependant, la tension présente aux bornes de branche d'un circuit parallèle est *toujours la même* et le courant total dépend de l'impédance totale *Z*. Dans le circuit représenté sur la **figure 6**, une résistance *R*, une bobine *L* et un condensateur *C* sont montés en parallèle entre les deux points de dérivation (ou de jonction). De ce fait, le courant total dans le circuit parallèle est égal à la somme des courants individuels. Il est également vrai que la somme des courants individuels ne peut être supérieure au courant total.

Il est essentiel de bien comprendre la différence entre un circuit série simple et un circuit parallèle simple. **Vous devez vous souvenir que le même courant circule dans les éléments d'un circuit série, alors que la même tension est appliquée aux bornes des éléments d'un circuit parallèle.**

10 Courants dans un circuit *RLC* parallèle

Les courants présents dans les branches individuelles d'un circuit parallèle peuvent être déterminés d'après la loi d'Ohm. Si,

par exemple, une résistance R de 5 Ω (ohms), une réactance capacitive X_C de 2 Ω et une réactance inductive X_L de 4 Ω sont montées en parallèle dans un circuit à c.a. de 1 V (volt), les courants individuels seront les suivants:



Dérivation résistive: $I_R = \dfrac{E}{R} = \dfrac{1}{5} = 0{,}2$ A (ampère)

Dérivation capacitive: $I_C = \dfrac{E}{X_C} = \dfrac{1}{2} = 0{,}5$ A

Dérivation inductive: $I_L = \dfrac{E}{X_L} = \dfrac{1}{4} = 0{,}25$ A

Puisque le courant capacitif I_C est en *avance* sur la tension appliquée et que le courant inductif I_L est en *retard* sur la tension, leur effet *s'oppose*. Ainsi, le courant résultant I_X est égal à la différence entre I_C et I_L, soit $I_X = 0{,}5 - 0{,}25 = 0{,}25$ A.

Pour calculer le courant total I provenant de I_R et I_X, on utilise la formule de la règle des carrés (somme vectorielle). Dans cette formule, on prend le carré de chaque valeur I_R et I_X (en multipliant la valeur par elle-même), puis on extrait la racine carrée de la somme des valeurs, soit:

$$\begin{aligned} I_T &= \sqrt{I_R^2 + I_X^2} \\ &= \sqrt{0{,}2^2 + 0{,}25^2} \\ &= \sqrt{0{,}04 + 0{,}0625} \\ &= \sqrt{0{,}1025} = 0{,}32 \text{ A, environ} \end{aligned}$$

Note. $0{,}2^2$ signifie «0,2 au carré», c'est-à-dire $0{,}2 \times 0{,}2$. Ainsi $0{,}2^2 = 0{,}2 \times 0{,}2 = 0{,}04$. De même, $0{,}25^2 = 0{,}25 \times 0{,}25 = 0{,}0625$

Les racines carrées peuvent être calculées à la main, à l'aide d'une calculatrice ou encore de tables que l'on trouve dans les manuels commerciaux ou techniques. Extraire la racine carrée signifie calculer un nombre qui, multiplié par lui-même, est égal au nombre donné, ($0{,}32 \times 0{,}32 = 0{,}1024$; la racine carré de 0,1024 est le nombre 0,32). La différence entre 0,1025 et 0,1024 s'explique par le fait que les nombres ont été arrondis.) Vous noterez que le courant total I_T est supérieur aux courants résistif et inductif, mais inférieur au courant capacitif. La **figure 7** montre ce rapport sous la forme d'un triangle.

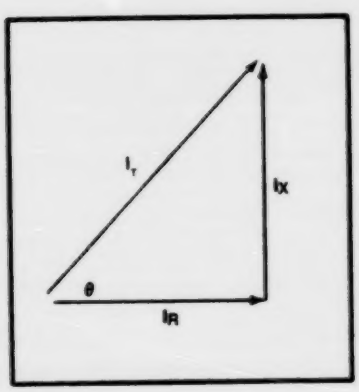


Fig. 7. Les courants dans un circuit *RLC* monté en parallèle produisent un déphasage entre les branches résistive et réactive. L'angle entre le courant total I_T et le courant résistif I_R est l'angle de phase θ.

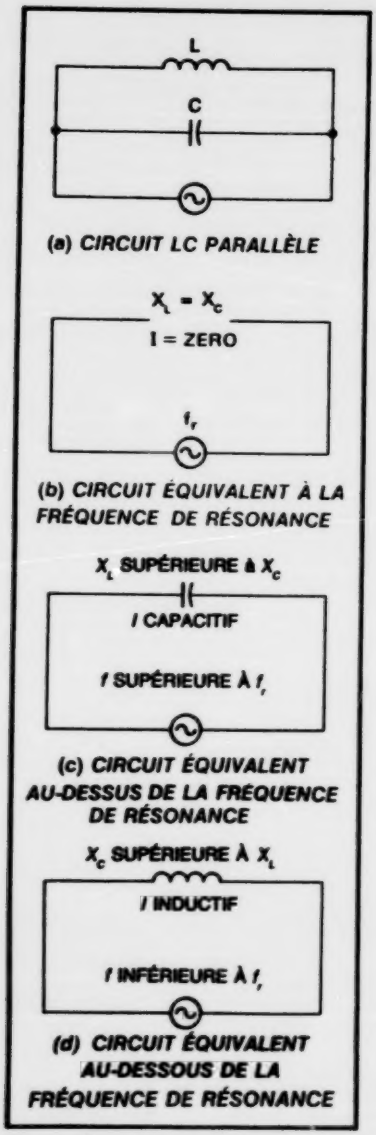


Fig. 8. À la fréquence de réconance, un circuit *LC* parallèle agit comme un circuit ouvert parce que l'impédance a une valeur maximale. Un circuit *LC* réconnant en parallèle est souvent appelé «circuit bouchon», parce qu'il est capable d'emmagasiner de l'énergie pendant une courte période. En faisant varier *L* ou *C*, ou les deux, on peut «accorder» le circuit sur une fréquence donnée. C'est souvent le cas pour les appareils de radio, de télévision et de télécommunications.

11 Circuits *LC* parallèle

Un circuit ayant une réactance capacitive X_C égale à la réactance inductive X_L est appelé *circuit résonant*. La **figure 8(*a*)** représente un circuit *LC* parallèle.

À la fréquence de résonance, les courants réactifs en avance et en retard sur les tensions sont égaux en intensité et déphasés de 180°, si bien qu'ils s'annulent. Les effets d'un circuit *LC* parallèle sont exactement opposés à ceux d'un circuit *LC* série. Un circuit *LC* parallèle présente une impédance maximale *Z* vis-à-vis des signaux à la fréquence de résonance f_r. Puisque l'impédance *Z* est maximale, aucun courant ne passe dans le circuit *LC* à la fréquence de résonance, et le circuit agit comme un *circuit ouvert*[1], comme le montre la figure 8(*b*).

À des fréquences *supérieures* à la fréquence de résonance f_r, la réactance inductive X_L est supérieure à la réactance capacitive X_C. Cependant, puisque la bobine *L* et le condensateur *C* sont en parallèle, le courant circule dans les deux branches et le courant le plus élevé correspond à la réactance la plus faible. Ainsi, le courant le plus élevé passe dans la branche capacitive. Le courant sortant du circuit parallèle est par conséquent capacitif, comme en (*c*), et le courant de sortie ou de secteur est *en avance* sur la tension.

À des fréquences inférieures à la fréquence de résonance f_r, la réactance capacitive X_C est supérieure à la réactance inductive X_L. Le courant le plus élevé passe donc dans l'inductance. Le courant sortant du circuit est inductif, comme en (*d*), et le courant de secteur est en retard sur la tension.

12 Courants et tensions dans les circuits bouchons

Il y a deux effets qui influent sur les courants et les tensions dans un circuit *LC* parallèle ou circuit bouchon: l'induction électromagnétique et l'induction statique.

1. On se réfère à un circuit *LC* parallèle ayant une inductance et une capacité pures.

L'induction électromagnétique provoque l'accumulation et la disparition d'un champ magnétique dans une inductance. L'induction électrostatique provoque l'accumulation d'un champ électrique dans un condensateur qui se décharge par la suite.

Puisque les courants produits par X_L et X_C à la fréquence de résonance sont égaux et qu'ils sont opposés, ils se déplacent *sans arrêt* entre l'inductance et la capacité. Cette action se produit parce que, lorsque le champ magnétique accumulé autour de l'inductance disparaît, le champ électrique s'accumule entre les plaques du condensateur. Ces circulations de courant *se répètent en permanence*. Puisque les réactances de L et de C sont égales à la fréquence de résonance f_r, il ne devrait pas être nécessaire de fournir un courant extérieur. Ce n'est qu'au moment où le circuit est mis en marche qu'un flux de courant initial, mais bref, est envoyé par la source de tension extérieure. Le courant initial, ou *courant de secteur*, est indispensable pour «exciter» ou alimenter le circuit.

Bien que le courant de ligne soit nul ou très faible, le courant qui circule peut s'accroître et atteindre de très hauts niveaux de tension aux bornes des éléments L et C, pour compenser la perte par effet Joule. De ce fait, des mesures de sécurité sont toujours de rigueur lorsqu'on travaille sur des circuits LC.

13 Résistance et coefficient de surtension Q des circuits résonants

Vous avez appris que le coefficient Q permettait de mesurer le bon fonctionnement d'une inductance L. Puisque Q est une comparaison entre la réactance inductive X_L et la résistance R, on peut également dire qu'un circuit LC a un coefficient Q.

Dans des circuits résonants série et parallèle, les résistances, qui sont normalement faibles, proviennent des matériaux conducteurs avec lesquels le condensateur, l'inductance et les conducteurs de raccordement sont fabriqués. En réduisant la résistance au minimum, on peut augmenter le coefficient Q d'un circuit résonant.

Exercice de contrôle 2

Voici quelques questions qui vous permettront de contrôler vos connaissances sur les circuits à c.a. parallèle. Si vos réponses sont fausses, réviser les sections citées en référence avant d'aller plus loin.

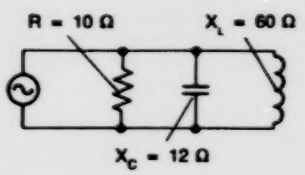
Vos réponses

1. Dans un circuit, le (la) même _____ traverse les éléments montés en *série* et le (la) même _____ est appliqué(e) aux éléments montés en *parallèle*.

1. _____
   _____

2. Calculez les courants I_R, I_C et I_L dans le circuit parallèle représenté ci-dessous. (Le circuit est alimenté par une source de c.a. de 120 V.)

2. I_R = _____
   I_C = _____
   I_L = _____



3. Vrai ou faux? Le circuit représenté à la question 2 fonctionne à la fréquence de résonance?

3. Vrai Faux
(Encerclez la bonne réponse)

4. Le circuit représenté à la question 2 est-il inductif ou capacitif?

4. _____

5. Dans un circuit bouchon, à la fréquence de résonance, les courants produits par X_C et X_L sont appelés courants circulants parce qu'ils _____ .

5. _____

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 2

1. Courant — Tension — Section 9

2. $I_R = \frac{E}{R} = \frac{120}{10} = 12$ A

$I_C = \frac{E}{X_C} = \frac{120}{12} = 10$ A

$I_L = \frac{E}{X_L} = \frac{120}{60} = 2$ A

Section 10

3. Faux — Section 11
(À la fréquence de résonance, $X_L = X_C$.)

4. Capacitif — Section 11
(I_C est supérieure à I_L).

5. Se déplacent sans arrêt. — Section 12

Applications des circuits résonants

14 Circuits de filtrage

Les applications courantes des circuits résonants et de leurs propriétés uniques de fréquence sont les circuits de filtrage utilisés dans les blocs d'alimentation électrique, et l'équipement de télécommunications, de téléphone, de radio et de télévision. Lorsque des signaux c.a. de différentes fréquences sont envoyés en même temps vers l'entrée du circuit de filtrage, un signal de sortie est émis à la fréquence désirée et les autres signaux sont réduits, atténués (affaiblis) ou éliminés. Avant d'aborder les circuits de filtrage, rappelons les deux règles qui s'appliquent aux éléments inductifs et capacitifs.

Règle 1. Pour une inductance, la réactance inductive X_L, ou l'opposition au flux de courant, est directement proportionnelle à l'inductance et à la fréquence: $X_L = 2\pi fL$; cela signifie que, lorsque la fréquence augmente, la réactance inductive augmente également.

Règle 2. Pour un condensateur, la réactance capacitive X_C, ou l'opposition au flux de courant, est indirectement proportionnelle à la capacitance et à la fréquence: $X_C \frac{1}{2\pi fC}$; cela signifie que, lorsque la fréquence augmente, la réactance capacitive diminue.

15 Circuits de filtrage *RL*

Un circuit *RL* à filtre passe-bas est représenté sur la figure 9, dans le schéma du haut. Ce circuit comprend une bobine fixe *L* et une résistance *R*. Un signal haute fréquence HF et un signal basse fréquence BF sont envoyés simultanément à l'entrée du circuit, comme l'indique le crochet.

D'après la règle 1 énoncée à la section 14, la bobine offre une moindre opposition au signal basse fréquence qu'au signal haute fréquence. Le signal basse fréquence traverse la bobine *L* et correspond au signal de sortie filtré du circuit.

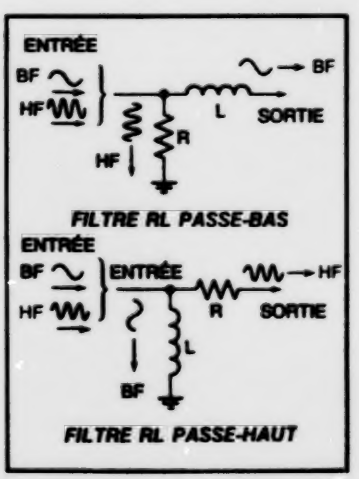


Fig. 9. L'inductance *L* offre une opposition aux signaux haute fréquence. La capacité *C* offre une opposition aux signaux basse fréquence. Ces circuits peuvent éliminer les signaux indésirables et acheminer les autres signaux.

Par ailleurs, le signal haute fréquence rencontre une plus faible opposition à traverser la résistance *R* que l'inductance *L*; il passe, ou est shunté, à travers la résistance et est acheminé vers la terre.

Dans le *circuit RL à filtre passe-haut* représenté sur le schéma inférieur de la **figure 9**, la bobine *L* est mise à la terre et la résistance *R* est raccordée à la sortie. Le signal basse fréquence traverse plus facilement la bobine pour atteindre la terre; par conséquent, le signal haute fréquence est le seul signal filtré qui sort du circuit en traversant la résistance.

16 Circuits de filtrage *RC*

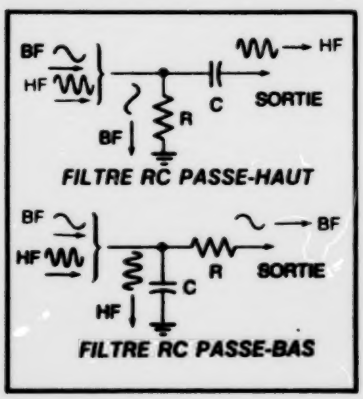


Fig. 10. Vous observerez que deux éléments seulement sont utilisés dans ces circuits de filtrage *RC* (ainsi que dans les circuits *RL* de la figure 9). Néanmoins, dans la pratique, les circuits de filtrage peuvent être munis de plusieurs éléments disposés selon différentes configurations pour obtenir des caractéristiques de filtrage uniques.

Le schéma au haut de la **figure 10** représente un circuit *RC* à filtre passe-haut. Ce circuit est formé par un condensateur *C* et une résistance *R*. D'après la règle 2 énoncée à la section 14, le condensateur offre une plus grande réactance, ou opposition, aux signaux basse fréquence qu'aux signaux haute fréquence. Lorsque des signaux haute et basse fréquence sont envoyés simultanément à l'entrée du circuit de filtrage, comme l'indique le crochet, le signal haute fréquence rencontre une plus faible opposition à traverser le condensateur que la résistance. Par conséquent, le signal haute fréquence traverse le condensateur *C* et représente le signal de sortie haute fréquence du circuit. Le signal basse fréquence rencontre une trop grande opposition à traverser le condensateur; il traverse donc la résistance *R* pour être ensuite acheminé vers la terre.

Dans le circuit *RC* à filtre passe-bas représenté sur le schéma inférieur de la **figure 10**, le signal basse fréquence traverse la résistance *R* et représente le signal de sortie filtré du circuit. Le signal haute fréquence, par ailleurs, rencontre une plus faible opposition à traverser le condensateur *C* et il est acheminé vers la terre.

17 Circuit à filtre passe-bande et circuit à filtre éliminateur de bande

Les effets résonants des circuits à c.a. sont également utilisés dans les circuits à filtre passe-bande et à filtre éliminateur de bande, comme le montre la **figure 11**.

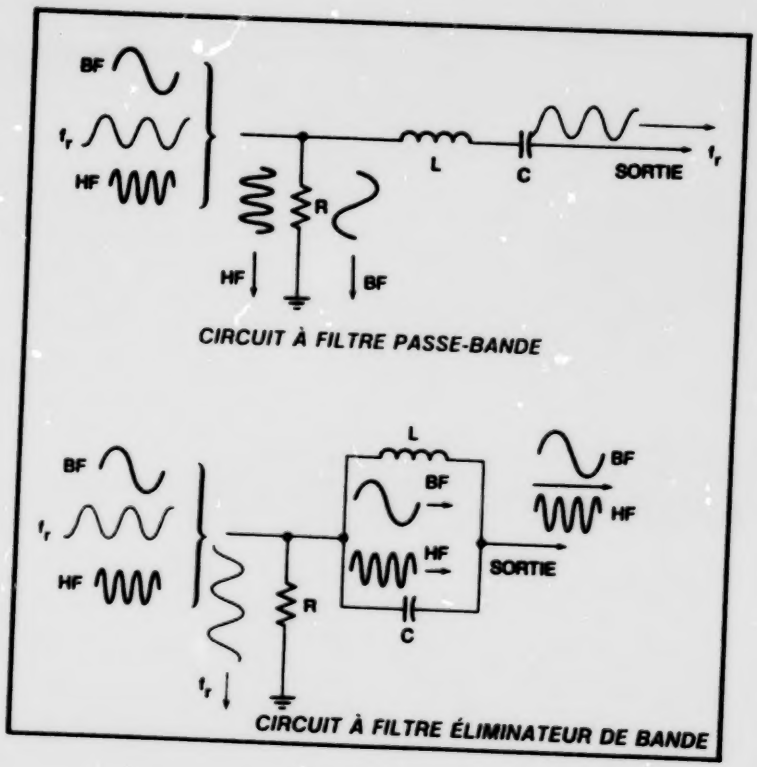


Fig. 11. Les composants *R*, *L* et *C* peuvent être sélectionnés pour former des circuits spéciaux qui peuvent soit passer, soit éliminer une bande de fréquences proches de la fréquence de résonance. Selon leur type, ces circuits sont souvent appelés circuits *éliminateurs* ou *à filtre éliminateur de bande*.

Le circuit à filtre passe-bande représenté dans le schéma du haut de la figure 11 est conçu pour passer les signaux à la fréquence de résonance f_r. La résistance *R* offre un chemin d'opposition assez faible vers la terre. Les signaux HF, dont les fréquences sont supérieures à la fréquence de résonance, rencontrent une forte impédance à la sortie. Cette impédance élevée produite par l'inductance *L* est supérieure à la résistance de *R* à la terre. Par conséquent, les signaux haute fréquence sont envoyés vers la terre en traversant la résistance *R*.

Les signaux BF dont les fréquences sont inférieures à la fréquence de résonance, rencontrent une impédance élevée à la sortie fournie par le condensateur *C* et ces signaux vont également à la terre en traversant la résistance *R*.

Cependant, le signal f_r, ainsi qu'une bande de fréquences très proches de la fréquence de résonance, rencontrent une très faible impédance à la sortie du circuit *LC* et, par conséquent, la traverse.

En ce qui concerne le circuit à filtre éliminateur de bande représenté sur le schéma du bas de la figure 11, les signaux à la fréquence de résonance rencontrent une impédance élevée à cause du circuit parallèle; par conséquent, les signaux f_r vont à la terre. Les

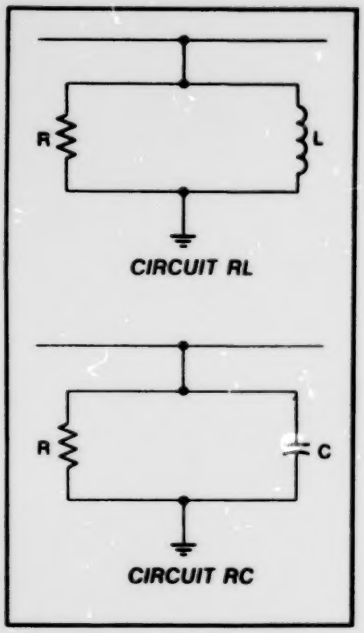


Fig. 12. On utilise souvent un circuit *RL* avec une inductance pour obtenir une bobine de crête. La résistance se comporte comme une résistance-série (à coefficient de température négligeable) pour élargir la réponse de fréquence de la bobine. On utilise couramment le circuit *RC* pour fournir au circuit une tension de référence, ou de polarisation.

signaux BF (dont les fréquences sont supérieures à la fréquence de résonance), trouvent la sortie en passant par le condensateur *C* dont l'impédance est faible par rapport à la résistance *R*. Par conséquent, les signaux haute fréquence (HF) vont à la terre.

De même, les signaux BF (dont les fréquences sont inférieures à la fréquence de résonance), se déplacent facilement dans l'inductance *L*; ils passent également vers la sortie. Le signal f_r, ainsi qu'une bande de fréquences très proches de la fréquence de résonance, passent (ou sont shuntés) vers la terre traversant la résistance; en conséquence, la bande de fréquences est éliminée ou rejetée.

18 Circuits *RL* et *RC* parallèle

Bien que les circuits *RL* et *RC* parallèle n'aient aucune propriété résonante, ils jouent un rôle important dans les équipements électroniques et de télécommunications. Par exemple, comme le montre le schéma du haut de la figure 12, on place parfois une résistance en face d'une bobine afin de réduire ou d'atténuer le *Q* de la bobine. Comme le montre le schéma du bas de la **figure 12**, une résistance placée en face d'un condensateur forme un circuit de filtrage spécial ayant une double fonction: d'abord, à cause du courant qui se déplace dans la résistance, une certaine chute de tension se produit dans la résistance. Deuxièmement, le condensateur agit pour maintenir la tension à une valeur de référence relativement constante et égale à la chute de tension.

Les résistances sont souvent utilisées comme résistances «de fuite». Dans ce cas, elles offrent au condensateur un chemin de décharge pour des raisons de sécurité.

Exercice de contrôle 3

Vous allez maintenant faire une pause de quelques minutes et revoir certains points-clés avant de répondre au questionnaire personnel. Comparez vos réponses aux nôtres et révisez, au besoin, les notions qui ne vous sont pas claires.

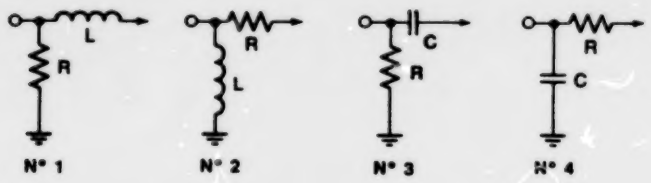
Vos réponses

1. Dans un circuit réactif, lorsque la fréquence augmente, la réactance inductive (augmente, diminue) _____ et la réactance capacitive (augmente, diminue).

1. _____
   _____

2. Parmi les circuits représentés ci-dessous, quels sont les deux circuits à filtre passe-bas?

2. Circuits n° _____ et n° _____



3. Parmi les circuits représentés au schéma de la figure 2, quels sont les circuits à filtre *passe-haut*?

3. Circuits n° _____ et n° _____

4. Dans un circuit à filtre passe-bande, un circuit *LC* (série, parallèle) _____ est raccordé à la sortie.

4. _____

5. La tension de référence fournie par un circuit *RC* parallèle est également appelée tension _____ .

5. _____

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 3

1. augmente, diminue
2. 1
   4
3. 2
   3
   Section 14
   Sections 15 et 16; figures 9 et 10
4. série
   Sections 15 et 16; figures 9 et 10
   Section 17, figure 11
5. de polarisation
   Section 18, figure 12

Examen personnel

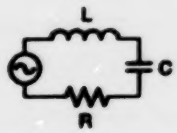
Lisez attentivement chacune des phrases suivantes et assurez-vous que vous en comprenez bien le sens. Chaque phrase est suivie de quatre mots ou groupes de mots dont un seul est correct. Faites un X sur la lettre correspondant à votre réponse.

1. Dans un circuit *RL* à c.c. série, le courant final est déterminé par:

   A. la constante de temps.
   B. la résistance.
   C. l'inductance.
   D. la réactance.

2. Pour un circuit *RLC* à c.a. monté en série, quelle est, parmi les phrases suivantes, celle qui s'applique?

   A. La tension présente dans chaque élément est égale à la tension de la source.
   B. Le flux de courant se déplace dans une direction.
   C. La tension est en avance sur le courant dans la résistance.
   D. Le même courant passe dans chaque élément.



3. L'impédance *Z* du circuit représenté ci-dessus se calcule par l'une des formules suivantes:

   A. $Z = \sqrt{R^2 + (X_L + X_C)^2}$.
   B. $Z = \sqrt{R^2 + (L - C)^2}$.
   C. $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$.
   D. $Z = \sqrt{R^2 - X_L^2 + X_C^2}$.

4. Dans un circuit à c.a., une résonance se produit lorsque :

   A. X_C est égale à X_L.
   B. la réactance inductive est égale à *R*.
   C. f_r est égale à zéro.
   D. la capacité est égale à 3,14.

5. Dans un circuit *RLC* à c.a. parallèle:

   A. le courant se divise en un point de jonction.
   B. le même courant passe dans chacune des branches.
   C. les courants dans les branches sont égaux à la tension totale.
   D. la tension appliquée est égale à la somme des courants individuels.

6. À la fréquence de résonance, un circuit *LC* parallèle à inductance et capacité pure se comporte comme:

   A. une inductance.
   B. un condensateur.
   C. un circuit ouvert.
   D. un court-circuit.

7. Dans le cas d'un circuit résonant *LC* monté en parallèle, le courant fourni par la source de tension est appelé:

   A. courant réactif.
   B. courant inductif.
   C. courant circulant.
   D. courant de secteur.

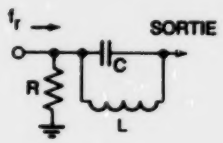
8. La réactance capacitive est inversement proportionnelle:

   A. à la fréquence et à la capacité.
   B. à la tension et à la fréquence.
   C. à l'inductance et à la tension.
   D. à la capacité et à l'inductance.

9. Parmi les phrases ci-dessous, quelle est celle qui s'applique au circuit *RC* à filtre passe-haut représenté sur la figure 10?

   A. Les basses fréquences traversent la bobine et se dirigent vers la sortie.
   B. Les hautes fréquences traversent la résistance et se dirigent vers la sortie.
   C. Les basses fréquences traversent la résistance et se dirigent vers la terre.
   D. Les hautes fréquences traversent le condensateur et se dirigent vers la terre.

10. Examinez attentivement le filtre éliminateur de bande représenté ci-dessous.



La fréquence de résonance f_r:

   A. Traverse la sortie en empruntant un circuit *LC* série.
   B. Traverse la sortie en empruntant un circuit *LC* parallèle.
   C. Est éliminée par une inductance et un condensateur en série.
   D. Est rejetée par un condensateur et une bobine en parallèle.

Les réponses sont données à la page 335.

Circuits à courant alternatif

AF0205

(Lexiques)

Français	Anglais
Atténuer	Dampen (to)
Barrière de potentiel	Voltage barrier
BF	Lo
Bobine	Inductor
Bobine de crête	Peaking coil
Branche	Branch
Calibre	Size (of a conductor)
Circuit (à filtre) passe-bande	Band-pass circuit
Circuit à filtre éliminateur	Band elimination circuit
Circuit bouchon	Trap circuit
Circuit de filtrage	Filter circuit
Circuit résonnant	Resonant circuit
Conducteurs de raccordement	Connecting leads
Courant circulant	Circulating current
Courant en avance de phase sur	Leading current
Courant en retard de phase sur	Lagging current
Courant résultant	Resulting current
Courant transitoire	Surge current
Crochet	Bracket
Filtre éliminateur de bande	Band rejection filter
Filtre passe-bas	Low-pass filter
Filtre passe-haut	High-pass filter
Fréquence de résonance	Resonant frequency
HF	Hi
Intensité de courant	Value (amount) of current
Interrupteur bipolaire à deux directions	Double pole-double throw switch
Interrupteur bipolaire à deux directions	DPDT switch
Perte par effet joule	Resistance loss
Régime permanent	Steady state
Règle des carrés	Rules of squares
Résistance de fuite	Bleeder resistor
Sélecteur de tension	Voltage select switch
Sélecteur de tension	Source select switch
Tension d'alimentation	Source voltage
Tension de polarisation	Bias voltage

Anglais	Français
Band elimination circuit	Circuit à filtre éliminateur
Band-pass circuit	Circuit (à filtre) passe-bande
Band rejection filter	Filtre éliminateur de bande
Bias voltage	Tension de polarisation
Bleeder resistor	Résistance de fuite
Bracket	Crochet
Branch	Branche
Circulating current	Courant circulant
Connecting leads	Conducteurs de raccordement
DPDT switch	Interrupteur bipolaire à deux directions
Dampen (to)	Atténuer
Double pole-double throw switch	Interrupteur bipolaire à deux directions
Filter circuit	Circuit de filtrage
Hi	HF
High-pass filter	Filtre passe-haut
Inductor	Bobine
Lagging current	Courant en retard de phase sur
Leading current	Courant en avance de phase sur
Lo	BF
Low-pass filter	Filtre passe-bas
Peaking coil	Bobine de crête
Resistance loss	Perte par effet joule
Resonant circuit	Circuit résonnant
Resonant frequency	Fréquence de résonance
Resulting current	Courant résultant
Rules of squares	Règle des carrés
Size (of a conductor)	Calibre
Source voltage	Tension d'alimentation
Source select switch	Sélecteur de tension
Steady state	Régime permanent
Surge current	Courant transitoire
Tank circuit	Circuit bouchon réservoir
Trap circuit	Circuit bouchon
Value (amount) of current	Intensité de courant
Voltage select switch	Sélecteur de tension
Voltage barrier	Barrière de potentiel

Redressement et dispositifs électroniques

AF0206

Redressement et dispositifs électroniques

Objectifs d'enseignement

Un redresseur est un dispositif électronique qui transforme une tension alternative en une tension continue. On utilise les redresseurs dans l'industrie lorsqu'une alimentation en c.c. (courant continu) est requise, tout particulièrement pour le fonctionnement des équipements électroniques.

Bien qu'une tension continue puisse être directement fournie par des génératrices de courant continu ou par des batteries, il est généralement plus facile et plus économique de produire une tension continue en redressant la tension alternative fournie par les compagnies d'électricité.

Ce cours a pour objectif de vous apprendre comment s'effectue le redressement et de vous présenter brièvement quelques dispositifs électroniques de base.

À la fin du cours, vous devriez être en mesure:

- *D'expliquer comment les diodes peuvent être utilisées comme redresseurs.*
- *De décrire le fonctionnement élémentaire de la triode utilisée comme amplificateur.*
- *De raccorder une jonction PN à une source de manière à obtenir une polarisation directe ou inverse.*
- *De monter des diodes en série ou en parallèle pour fournir une tension (ou un courant) plus élevée que celle fournie par une diode indépendante fonctionnant de manière isolée.*
- *D'expliquer comment un transistor peut fonctionner comme amplificateur.*
- *De reconnaître des circuits transistorisés d'entrée et de sortie.*
- *De comparer des sorties de redresseurs (avec ou sans filtre).*
- *D'inverser la polarité d'une tension de sortie continue dans le schéma d'un redresseur.*
- *De calculer la fréquence d'ondulation de circuits redresseurs monophasés et triphasés à une ou deux alternances.*

Table des matières

Diodes et triodes

Dispositifs électroniques	213
Émission d'électrons à partir d'un matériau	214
Caractéristiques générales des tubes électroniques	214
Flux de courant dans une diode à vide poussé	215
Obstacle au flux de courant	215
Effet de la vapeur ou du gaz dans une diode	216
Diode fonctionnant comme redresseur demi-onde	217
Diode fonctionnant comme redresseur pleine-onde	218
Triodes	218
Thyratrons	220
Exercice de contrôle 1	221

Diodes semiconductrices

Semiconducteurs	223
Redresseur semiconducteur	223
Redresseur au sélénium	224
La jonction PN	224
Flux de courant dans une jonction PN	225
Éléments d'une diode à jonction PN	226
Diode à pointes	226
Redresseur à diode au silicium	227
Exercice de contrôle 2	228

Transistors et thyristors

Transistors	230
Courant dans un transistor à jonction	231
Circuits transistorisés d'entrée et de sortie	232
Transistor fonctionnant comme amplificateur	233
Construction des circuits intégrés	234
Thyristors	234
Redresseur commandé au silicium (SCR)	234
Triac	235
Exercice de contrôle 3	237

Circuits redresseurs

Circuits redresseurs demi-onde 239
Effet de l'inversion de la diode 240
Filtres 241
Alimentations 242
Alimentations pleine-onde 242
Fonctionnement du redresseur pleine-onde 243
Bobine de filtrage 244
Fréquence d'ondulation 245
Filtres de redresseurs pleine-onde 245
Circuit redresseur en pont 246
Circuit redresseur triphasé 247
Exercice de contrôle 4 249

Examen personnel 251

Lexiques 253

Diodes et triodes

1 Dispositifs électroniques

Le redressement, c'est-à-dire la transformation d'une tension alternative en une tension continue s'effectue généralement au moyen d'un dispositif électronique appelé redresseur. La plupart des équipements électroniques fonctionnent en c.c. (courant continu), si bien que les redresseurs font souvent partie intégrante de ces équipements. (Bien que le redressement puisse être effectué par des moyens mécaniques, cette technique n'est pas pratique et ne sera pas abordée dans le présent cours.)

Avant de parler des redresseurs de manière plus détaillée, il serait peut-être utile d'introduire brièvement l'électronique et les dispositifs électroniques par cette remarque générale:

Le domaine de l'électronique fait appel à des dispositifs dont le fonctionnement dépend soit de la régulation du flux d'électrons dans le vide ou un gaz, soit de l'action des électrons dans des matériaux solides appelés *semiconducteurs*. Dans un cours précédent, vous avez appris qu'un semiconducteur est un matériau dont la résistance est supérieure à celle d'un conducteur, mais inférieure à celle d'un non-conducteur (ou isolant).

Les premiers dispositifs électroniques étaient des *tubes électroniques* ou tubes à vide. Le fonctionnement de ces tubes dépendait de la régulation sous basse pression du flux d'électrons dans le vide ou dans un gaz. On peut citer deux types de dispositifs électroniques plus récents, à savoir la *diode semiconductrice* et le *transistor*. Dans ces appareils, les électrons circulent dans des semiconducteurs.

Parmi les applications les plus connues des dispositifs électroniques, on peut citer les récepteurs de télévision et de radio ainsi que les calculatrices. Les dispositifs électroniques sont également utilisés depuis longtemps pour le téléphone, la télévision, le cinéma et les systèmes de diffusion publique. De nos jours, ils sont intégrés dans les ordinateurs, les appareils de commande industriels, les instruments de pilote automatique des avions, les fusées, les engins spatiaux et les satellites.

2 Émission d'électrons à partir d'un matériau

Dans un cours précédent, vous avez appris que les électrons sont continuellement en mouvement dans un conducteur, même lorsque aucune tension n'y est appliquée. Dans ce cas, c'est-à-dire en l'absence de tension, les mouvements des électrons sont aléatoires: ils ne suivent ni plan, ni modèle défini. Cependant, lorsqu'une tension est appliquée à un conducteur dans un circuit fermé, les électrons se déplacent dans une direction précise et produisent un courant électrique.

Dans certains matériaux, et dans certaines conditions, les électrons sont parfois agités avec une telle violence et déplacés à de telles vitesses qu'ils se détachent du conducteur pour tournoyer dans l'espace qui les entoure. Cette libération violente d'électrons est appelée *émission d'électrons*.

L'émission d'électrons dans un conducteur peut se produire de différentes manières: 1) en chauffant le conducteur à une température déterminée, 2) en exposant le conducteur à une forte lumière ou 3) en soumettant le conducteur à une très haute tension. Par ailleurs, si des électrons provenant d'une autre source viennent frapper le conducteur à une vitesse suffisante, ils peuvent déloger d'autres électrons émis par le conducteur.

3 Caractéristiques générales des tubes électroniques

Un tube électronique se compose principalement de deux ou plusieurs électrodes montées dans une enveloppe fermée et étanche, en verre ou en métal, dans laquelle la quasi-totalité de l'air a été évacuée. Dans certains tubes électroniques, appelés *tubes à vide poussé*, l'espace entourant les électrodes constitue un vide presque parfait. Dans d'autres tubes, appelés *tubes à gaz*, une faible quantité de vapeur de mercure ou de gaz inerte (comme l'hélium, l'argon ou le néon) est admise dans l'espace entourant les électrodes. L'une des bornes de chaque électrode est placée à *l'extérieur* de l'enveloppe, afin que le tube puisse être raccordé à un circuit.

Dans un tube électronique, les électrons sont émis par une électrode et attirés par l'autre. L'électrode qui émet les électrons est appelée *cathode*; l'électrode qui attire les électrons est appelée *anode*. Du fait que la cathode d'un tube électronique est souvent en forme de *filament*, comme le filament d'une lampe à incandescence, le terme filament est parfois utilisé au lieu de «cathode». Par ailleurs,

du fait que, dans les premiers tubes, les anodes étaient fabriquées dans des tôles métalliques plates, le terme *plaque* est souvent utilisé à la place d'«anode».

Certains tubes électroniques ne contiennent que deux éléments actifs (ou électrodes): une cathode et une anode. D'autres tubes contiennent des éléments actifs supplémentaires. Un tube à vide ne contenant que deux éléments actifs est appelé *diode*.

4 Flux de courant dans une diode à vide poussé

Le schéma supérieur de la **figure 1** représente un circuit dans lequel une diode à tube à vide est raccordée à une batterie. La borne positive de la batterie est raccordée à l'anode du tube électronique. Par ailleurs, la borne négative de la batterie est raccordée à la cathode. Lorsque la cathode est chauffée, elle émet (ou libère) des électrons qui se déplacent vers l'anode, en traversant l'espace compris entre les électrodes, et un courant électrique circule dans le circuit dans la même direction. (Le raccord d'un milliampèremètre A à la position indiquée dans le schéma indiquerait la présence d'un courant.)

Dans le tube électronique représenté ici, les électrons sont émis par la cathode lorsqu'elle est directement chauffée par le courant qui y circule. Parfois, la cathode est chauffée indirectement par un filament placé à proximité d'elle, à l'intérieur du tube.

L'un des désavantages des tubes à vide est le délai de «réchauffement» de 20 à 30 secondes de l'équipement avant que les cathodes ne commencent à émettre des électrons.

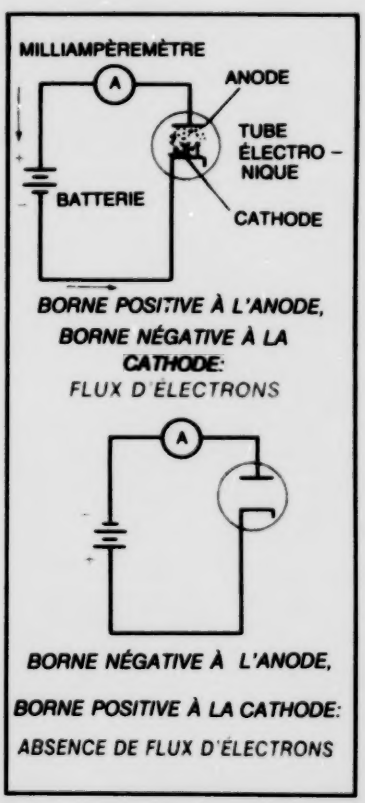


Fig. 1. La diode à tube à vide se comporte pratiquement comme une valve qui laisse un fluide (des électrons, dans le cas présent) s'écouler dans une seule direction. En Angleterre, les tubes électroniques sont en fait appelés «valves».

5 Obstacle au flux de courant

Dans la partie inférieure de la **figure 1**, la borne négative de la batterie est raccordée à l'anode du tube électronique, alors que la borne positive est raccordée à la cathode. Cependant, à cause de l'assemblage de la cathode, les électrons ne sont émis que par cette dernière: aucune émission ne se produit à partir de l'anode. Puisque l'anode est maintenant chargée négativement par rapport à la cathode, elle a tendance à rejeter (repousser) tous les électrons émis par la cathode. De plus, puisqu'aucun électron n'est émis par l'anode, l'anode n'ajoute aucun électron à la cathode. Par conséquent, aucun courant ne peut circuler dans le circuit.

Donc, comme nous venons de le voir, le courant ne peut circuler dans le circuit représenté à la figure 1 que si l'anode est positive et la cathode négative. Le courant passe de la cathode du tube électronique à l'anode: il ne peut pas circuler dans la direction opposée. En d'autres termes, une diode permet au courant de circuler dans une direction et l'empêche en même temps de circuler dans la direction opposée.

Un courant ne peut circuler dans un circuit contenant une diode à tube à vide (que l'on appelle parfois diode à vide poussé) que si l'anode est chargée positivement par rapport à la cathode. Si la batterie est déconnectée de l'anode, une charge négative s'accumule autour de la cathode à cause de la présence des électrons émis par cette dernière. Cette charge est appelée *charge d'espace*. La charge d'espace sert de réservoir aux électrons qui sont attirés vers l'anode lorsque celle-ci est chargée positivement par rapport à la cathode. Cependant, la charge d'espace limite le flux de courant dans le tube parce qu'elle limite l'émission d'électrons supplémentaires à partir de la cathode.

6 Effet de la vapeur ou du gaz dans une diode

Si une très faible quantité de mercure liquide pénètre dans une diode à vide poussé chauffée, une vapeur ou un gaz se forme, et le tube se remplit de cette vapeur de mercure. Lorsqu'une source de tension positive très basse est raccordée à l'anode, un nombre relativement limité d'électrons, qui se déplacent de la cathode vers l'anode, entrent en collision avec les atomes de vapeur de mercure. Du fait que ces électrons se déplacent relativement lentement, ils percutent simplement les atomes de mercure. Donc, à basse tension, le seul effet des atomes de vapeur est d'interférer avec le flux de certains électrons, en leur bloquant le passage.

Cependant, lorsqu'on augmente la tension de l'anode, la vitesse des électrons augmente et le nombre de collisions avec les atomes de vapeur augmente également. Du fait de la grande vitesse à laquelle un électron frappe un atome dans ces conditions, l'électron est capable de libérer un électron de l'atome. Un atome qui a ainsi perdu un électron est appelé ion positif: c'est un atome qui a une charge électrique positive. La formation d'ions positifs de vapeur de mercure tend à neutraliser les électrons dans la charge d'espace et, si

la tension de l'anode augmente suffisamment, la charge d'espace est complètement neutralisée. En d'autres termes, les électrons dans la charge d'espace servent à augmenter le courant.

Donc, les redresseurs à vapeur de mercure peuvent fonctionner à des courants plus élevés que les redresseurs à vide. Par ailleurs, la chute (ou perte de tension) dans le redresseur au mercure est moindre que dans un redresseur à tube à vide. Une lueur violacée émane des redresseurs à vapeur de mercure à cause de l'ionisation de la vapeur de mercure.

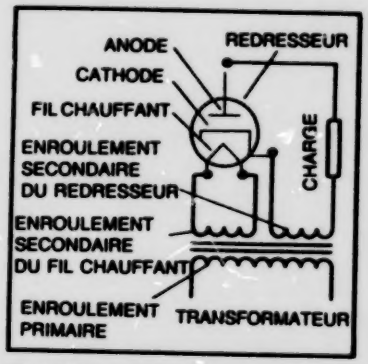


Fig. 2. Un redresseur ressemble à un interrupteur. La différence essentielle est que le courant peut circuler dans les deux directions dans un interrupteur fermé, alors qu'il ne peut passer que dans une seule direction, soit de la cathode vers l'anode, dans un redresseur.

7 Diode fonctionnant comme redresseur demi-onde

Puisqu'une diode permet au courant de la traverser dans une seule direction (et l'empêche de circuler dans la direction opposée), elle peut servir à convertir un c.a. (courant alternatif) en un courant continu intermittent. L'appareil utilisé pour convertir un courant alternatif en courant continu est appelé, comme nous l'avons déjà dit, *redresseur*.

La figure 2 représente le schéma d'un circuit à c.a. dans lequel une diode est utilisée comme redresseur. Le courant alternatif dans l'enroulement primaire du transformateur force les courants alternatifs à passer par les deux enroulements secondaires séparés du transformateur (dans ce cas, la cathode du tube électronique est chauffée indirectement par un filament). Ce filament (fil chauffant) et la bobine (ou enroulement) secondaire du transformateur forment par eux-mêmes un circuit; la chaleur nécessaire pour maintenir le filament à la température convenable est fournie par le courant alternatif qui circule dans cette bobine.

Le courant alternatif qui circule dans le circuit du redresseur et d'une charge est fourni par l'autre bobine secondaire du transformateur. Lorsque la tension de la bobine secondaire rend l'anode du redresseur positive (par rapport à la cathode), le courant circule dans le redresseur et dans la charge. Lorsque la direction de la tension est inversée dans la bobine, le redresseur empêche le passage du courant dans la charge. Par conséquent, le courant qui circule dans la charge peut être représenté par des courbes intermittentes, comme le montre la partie supérieure de la figure 3. Un circuit à diode, permettant au courant continu de circuler dans la charge pendant la moitié de chaque cycle de courant alternatif, est couramment appelé *circuit redresseur à demi-onde*, ou simplement redresseur demi-onde.

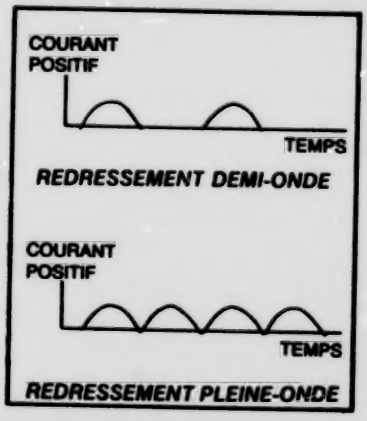


Fig. 3. Vous observerez que dans les redressements demi-onde et pleine onde[1], le courant est à tout moment positif et ne change pas de direction.

1. Ce type de redresseur est aussi appelé DOUBLE ALTERNANCE.

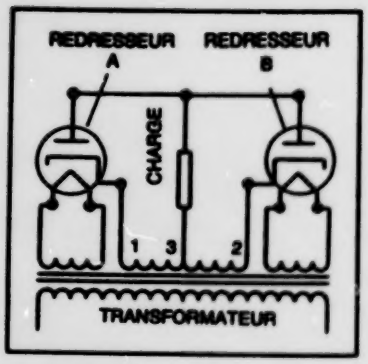


Fig. 4. Le redresseur pleine-onde nécessite en fait deux redresseurs. L'un ou l'autre est toujours conducteur bien que la direction du courant circulant dans la charge soit toujours la même.

8 Diode fonctionnant comme redresseur pleine-onde

On peut produire un courant continu dans une charge en utilisant deux diodes. Ces deux diodes sont raccordées dans le même circuit de manière que les deux moitiés du courant alternatif, la tension appliquée à la charge et le courant qui y circule, correspondent toujours à la même direction. On peut représenter le courant continu produit par la série de courbes reproduites au bas de la figure 3. On peut utiliser un seul tube contenant deux diodes séparées, au lieu de deux tubes séparés. Dans les deux cas, il s'agit d'un *redresseur*.

Lorsque le point *3* du secondaire du transformateur est positif par rapport au point *1*, le redresseur *A* est conducteur. Pendant le demi-cycle du c.a. suivant, le point 3 est positif par rapport au point *2* et le redresseur *B* est conducteur. Chaque redresseur est conducteur en alternance pendant un demi-cycle, assurant ainsi un redressement à chaque demi-cycle, ou *redressement pleine-onde*.

9 Triodes

Jusqu'à présent, nous avons parlé des diodes à tube à vide, qui sont des tubes contenant deux électrodes ou éléments actifs (plaque ou anode et la cathode), et de la manière dont elles peuvent être utilisées. (Le filament n'est pas considéré comme un élément actif, sauf quand il sert aussi de cathode.) Un tube contenant *trois* électrodes est appelé *triode*. Dans une triode, la troisième électrode est un écran métallique mince appelé *grille*, placé entre la cathode et l'anode, comme le montre la figure 5. Une faible différence de potentiel ou de tension entre la grille et la cathode permet de contrôler efficacement le nombre d'électrons qui atteignent l'anode. Normalement, dans une triode, une tension appelée *tension de polarisation*, ou *polarisation*, rend la grille négative par rapport à la cathode, ce qui empêche les électrons émis par la cathode d'être attirés vers la grille au lieu de l'anode.

Supposons maintenant que l'on change la tension de la grille d'une manière ou d'une autre. Au fur et à mesure que la grille devient moins négative par rapport à la cathode, un nombre de plus en plus élevé d'électrons atteignent l'anode. Un changement très faible de

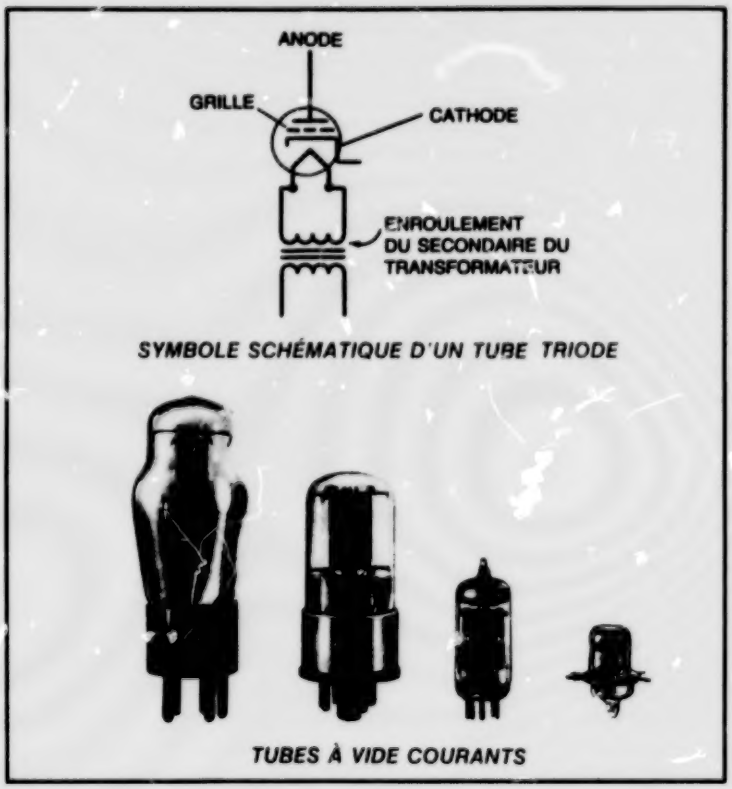


Fig. 5. Dans ce symbole schématique de la triode, on voit que la cathode est indirectement chauffée par le filament. Dans certains tubes, le filament joue aussi le rôle de cathode.

la tension de la grille provoque un changement important du courant qui circule de la cathode vers l'anode. Si la grille est suffisamment négative, tous les électrons émis par la cathode sont repoussés par la grille et ne peuvent atteindre l'anode; par conséquent, aucun courant ne circule dans le tube si la grille est fortement négative.

Puisque de faibles tensions appliquées à la grille peuvent contrôler les flux de courant et de tension relativement élevés, la triode peut être utilisée dans les circuits comme amplificateur. Lorsqu'une faible tension alternative est appliquée à la grille, les légères fluctuations de tension provoquent des variations importantes de la tension cathode-anode. Cette tension est un signal fortement amplifié ayant exactement les mêmes caractéristiques que la faible tension appliquée à la grille.

L'amplificateur est le «coeur» de pratiquement tout système électronique. Cependant, la triode à tube à vide, comme la diode à tube à vide, sont rarement utilisées de nos jours dans les nouveaux équipements. Elles sont désormais remplacées par les semiconducteurs qui remplissent la même fonction, mais avec une plus grande efficacité.

Nous aborderons ultérieurement dans ce cours les semiconducteurs (ou diodes semiconductrices) et les transistors, de manière plus détaillée.

10 Thyratrons

Dans vos activités d'électricien d'entretien d'usine, vous serez sans doute amené à travailler à un autre type de tube. Il existe un type spécial de triode, soit une triode à gaz à grille commandée, appelée *thyratron*. Elle est semblable au tube redresseur à gaz. Mais dans ce cas, un élément de commande, la grille, est inséré entre la cathode et la plaque. Ainsi, le thyratron peut également être considéré comme une triode à gaz.

Supposons que la tension de grille du thyratron soit considérablement plus positive que la tension de coupure (valeur nulle). Si nous augmentons graduellement cette polarisation positive, nous observons, au point où le courant de plaque[1] commence à circuler, que celui-ci saute brutalement de zéro à une valeur très élevée. Si l'état du circuit le permet, le courant atteint rapidement le niveau de pleine émission de la cathode, les tensions de l'anode pouvant descendre jusqu'à 15 à 20 V (volts). Lorsque le courant de plaque commence à circuler, la grille de commande n'a plus d'effet, quelle que soit sa charge négative. Pour arrêter le courant de plaque, il faut en abaisser la tension à un niveau inférieur au potentiel d'ionisation du gaz dans le tube.

Par conséquent, le thyratron est utilisé comme relais ou déclencheur dans de nombreuses applications d'importance, notamment dans les automatismes industriels. L'énergie nécessaire au niveau de la grille pour enclencher la décharge est très faible tandis que l'énergie fournie peut atteindre plusieurs kilowatts.

De nos jours, le thyratron est remplacé par des dispositifs à semiconducteurs équivalents dont nous parlerons ultérieurement.

1. Également appelé «courant anodique» dans la littérature scientifique.

Exercice de contrôle 1

Vous allez maintenant faire une petite pause pour revoir quelques points-clés. Si vos réponses sont différentes des nôtres, vous trouverez l'explication en vous reportant à la section indiquée en face de chaque réponse.

Vos réponses

1. Dans votre usine, un vieux système de diffusion publique doit être branché chaque jour 30 secondes au moins avant de pouvoir fonctionner. Cela est dû au fait que dans le redresseur à tube à vide (et dans les autres tubes à vide), les électrons ne peuvent être émis par la cathode que si l'équipement est mis en marche et que la cathode est suffisamment (soumise à une vibration, chauffée) _____ pour libérer les électrons.

   1. _____

2. Pour qu'il y ait un flux d'électrons dans une diode, la tension de la cathode doit être (négative, positive) _____ et la tension de l'anode doit être (négative, positive) _____ .

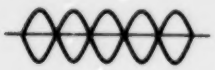
   2. _____
      _____

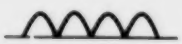
3. Par rapport au redresseur à vide, le redresseur à vapeur de mercure fonctionne avec une chute de tension (plus faible, plus élevée) _____ et à des courants (plus élevés, plus faibles) _____. Il présente également une lueur _____ .

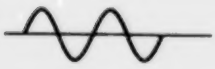
   3. _____
      _____
      _____

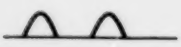
4. À l'aide d'un oscilloscope, vous pouvez observer l'onde de tension produite à la sortie d'un redresseur. Lorsque vous observez la sortie d'un redresseur pleine-onde, quelle est, parmi les ondes représentées ci-dessous, celle que vous verrez apparaître?

   4. _____

   A. 

   C. 

   B. 

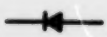
   D. 

5. Lorsque vous ajoutez, entre l'anode et la cathode d'une diode à tube à vide, un élément appelé _____ , vous obtenez un(e) _____ qui peut être utilisé(e) comme amplificateur.

   5. _____
      _____

6. Des symboles reproduits ci-dessous, quel est celui qui désigne un tube à vide à triode?

   6. _____

   A. 

   C.

   B.

   D.

Voir les réponses à la page suivante

Dans l'espace réservé en face de chaque mot ou groupe de mots de la colonne de droite, inscrivez la lettre correspondant à la phrase suivante qui l'explique le mieux.

7. *a.* Transforme une tension alternative en une tension continue.
   b. Élément d'un tube à vide qui émet les électrons.
   c. Tube à vide ne contenant que deux électrodes.
   d. Tube à vide contenant trois électrodes.
   e. Atome qui a perdu un électron.
   f. Direction du flux d'électrons dans une diode à tube à vide.

7. ___ Cathode
   ___ Diode
   ___ Redresseur
   ___ Cathode-anode
   ___ Triode
   ___ Ion positif

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 1

1. chauffée — Section 4
2. négative positive — Section 5
3. plus faible plus élevés violacée — Section 6
4. C — Sections 7, 8, figure 3
5. grille triode — Section 9
6. C — Section 9, figure 5
7. *b* Cathode — Section 3
   c Diode — Section 3
   a Redresseur — Section 1
   f Cathode-anode — Section 4
   d Triode — Section 9
   e Ion positif — Section 6

Diodes semiconductrices

11 Semiconducteurs

Comme vous l'avez appris, les métaux peuvent conduire un courant électrique à cause de la présence de nombreux électrons libres. Par ailleurs, dans les matériaux isolants, les électrons sont étroitement liés au noyau des molécules, de sorte qu'aucun courant électrique n'y circule.

Entre ces deux classes de matériaux conducteurs et non conducteurs, on trouve un groupe de matériaux qui n'est pas naturellement bon conducteur, mais qui peut le devenir dans certaines conditions. Ces matériaux, comme le germanium et le silicium, sont appelés semiconducteurs. Les semiconducteurs sont utilisés comme matériaux de base dans de très importants appareils électroniques, comme les redresseurs et les amplificateurs, qui sont aujourd'hui beaucoup plus couramment utilisés que les redresseurs à vide poussé ou à gaz.

12 Redresseur semiconducteur

Entre autres applications, les matériaux semiconducteurs sont utilisés comme redresseurs. Dans un *redresseur semiconducteur*, un grand nombre d'électrons peuvent se déplacer dans une seule direction. Nous expliquerons ce phénomène ultérieurement lorsque nous parlerons des jonctions PN.

On peut augmenter la capacité des redresseurs semiconducteurs soit en montant en série une pile d'éléments redresseurs, pour augmenter la *tension*, soit encore en montant les piles d'éléments en parallèle pour augmenter le *courant*.

L'un des premiers redresseurs semiconducteurs fut le redresseur à oxyde de cuivre, formé en oxydant la surface d'une plaque en cuivre. Lorsqu'on applique une tension entre la surface oxydée et le cuivre, le courant circule immédiatement de la surface oxydée vers le cuivre (mais non dans la direction inverse). Les redresseurs à oxyde de cuivre sont de nos jours rarement utilisés dans les équipements industriels.

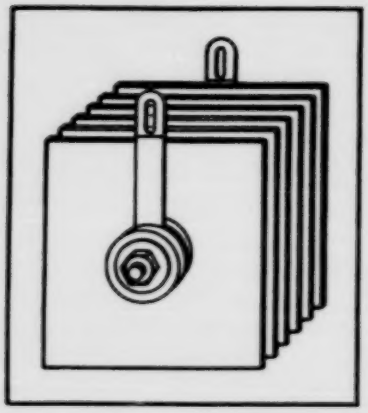


Fig. 6. Le redresseur au sélénium se compose d'une série de disques empilés pour augmenter la tension nominale du redresseur.

13 Redresseur au sélénium

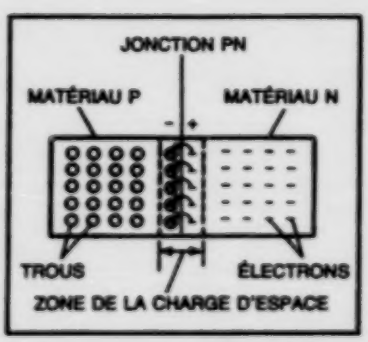
Le redresseur au sélénium ressemble au redresseur semiconducteur à oxyde de cuivre, si ce n'est que le sélénium est utilisé comme élément redresseur. Dans cet élément, une mince couche de sélénium est déposée sur une plaque ou disque revêtu d'aluminium. Ensuite, on applique par vaporisation une mince couche de métal sur le sélénium, formant ce qu'on appelle une contre-électrode. La jonction entre la couche de sélénium et la couche de métal vaporisée permet au courant de circuler facilement dans une seule direction, à savoir de la couche de sélénium vers la couche de métal. La jonction offre une grande résistance au flux de courant qui circule de la couche de métal vers la couche de sélénium. Lorsqu'on utilise plusieurs éléments (pour former une pile), des rondelles à ressort sont intercalées pour assurer un bon contact entre les éléments ou disques.

La **figure 6** représente un redresseur au sélénium caractéristique. On trouve encore des redresseurs de ce type dans certaines applications industrielles, mais non dans les équipements récents.

14 La jonction PN

Le germanium et le silicium sont les matériaux les plus couramment utilisés aujourd'hui dans les dispositifs à semiconducteurs. On utilise le germanium dans les diodes et les transistors à faible et moyenne puissance. Le silicium est mieux adapté aux appareils à haute puissance parce qu'il est moins sensible aux fortes températures.

On peut augmenter et contrôler la conductivité des semiconducteurs en ajoutant de faibles quantités d'éléments appelés «impuretés». Ce procédé est parfois appelé «dopage». Par exemple, le bore peut servir d'élément dopant au silicium. Certains éléments dopants produisent des matériaux de type N, ayant un excès d'électrons. D'autres produisent des matériaux de type P caractérisés par un manque d'électrons. Toute position du réseau cristallin où il manque un électron est appelée «trou».



Courtoisie de RCA

Fig. 7. À la jonction PN, les «trous» présents dans le matériau de type P proviennent des électrons manquants.

Une couche de matériau de type P reliée à une couche de matériau de type N est appelée jonction PN. Lorsqu'une telle jonction est formée entre des matériaux N et P, comme le montre la **figure 7**, une interaction se produit: certains des électrons en excès provenant

du matériau négatif (N) diffusent au travers de la jonction pour remplir les trous présents dans le matériau positif (P).

La redistribution d'électrons crée une petite *charge d'espace*, ou *barrière* de potentiel, près de la jonction. Le matériau positif dans cette zone acquiert une légère charge négative (du fait de l'addition d'électrons); le matériau de type N devient légèrement positif (en raison de la perte d'électrons excédentaires). L'effet combiné est le même que si une batterie était raccordée aux bornes de la jonction (polarité «+» et «-»), comme le montre la figure 7. La différence de tension (ou gradient de potentiel) dans la zone de la charge d'espace empêche toute autre diffusion dans la jonction PN, gardant ainsi les différences de base caractérisant les types de matériaux.

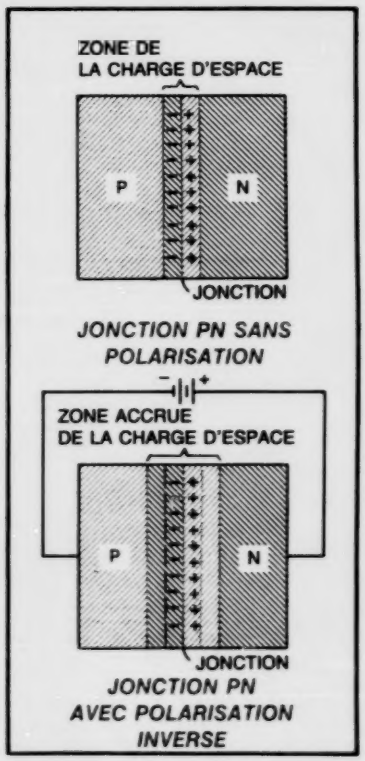


Fig. 8. La borne positive de la batterie est reliée au matériau de type N et la borne négative au matériau de type P, ce qui provoque une polarisation inverse.

15 Flux de courant dans une jonction PN

Lorsqu'une batterie est raccordée aux bornes d'une jonction PN, on observe un flux de courant. Le courant dépend de la polarité de la tension appliquée et de son effet sur la zone de la charge d'espace.

Le schéma supérieur de la **figure 8** représente une jonction PN; l'illustration du bas représente la même jonction raccordée à une batterie pour obtenir une *polarisation inverse*. On dit qu'une jonction est en *polarisation inverse* lorsque la tension externe à ses bornes provoque un flux de courant faible ou nul. Cette polarisation inverse augmente efficacement la largeur de la zone de la charge d'espace, et le gradient de potentiel s'élève pour se rapprocher du potentiel de la batterie externe. Le flux de courant en polarisation inverse est alors extrêmement faible.

En présence d'une polarisation directe, la batterie est inversée, comme le montre la **figure 9**. La zone de l'espace de charge disparaît presque totalement et un flux de courant important traverse la jonction, au fur et à mesure que des électrons se déplacent vers le matériau de type P et que des trous se déplacent vers le matériau de type N.

Le concept de polarisation directe et inverse est important car il s'applique non seulement aux diodes, mais encore à tous les types de semiconducteurs. Vous vous souviendrez simplement des deux règles suivantes:

Règle 1. Si la tension appliquée rend la couche de type N positive et la couche de type P négative, la diode ou jonction est en polarisation inverse et empêche le flux de courant.

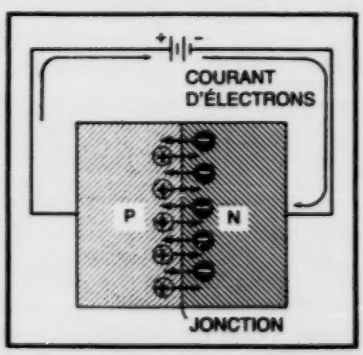


Fig. 9. Lorsqu'une jonction est en polarisation directe, des électrons traversent la jonction pour venir remplir les trous.

Règle 2. Si la tension appliquée maintient la couche de type N négative et la couche de type P positive, la diode ou jonction est en polarisation directe et crée un flux de courant important qui traverse la jonction et circule dans le circuit externe.

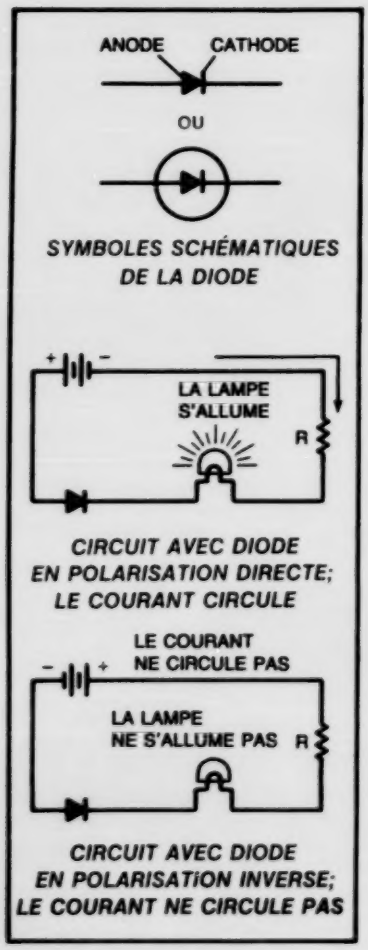


Fig. 10. Le symbole schématique de la diode peut être représenté avec ou sans cercle. Vous observerez que la flèche du symbole pointe dans une direction opposée à celle du flux d'électrons.

16 Éléments d'une diode à jonction PN

La couche positive P et la couche négative N sont les deux éléments d'une diode à jonction PN. La couche négative est appelée *cathode* ou élément émetteur d'électrons. La couche positive est appelée *anode* ou élément collecteur d'électrons. Le symbole schématique d'une diode (de type tube à vide ou semiconductrice) est représenté à la **figure 10**. Dans ce symbole, la flèche représente l'anode et la barre verticale, la cathode.

Ce schéma montre également les conditions requises pour la polarisation directe et inverse d'une diode. Dans la polarisation directe, la borne négative de la batterie doit être raccordée à la cathode et la borne positive à l'anode. Ce type de configuration se traduit par un flux important d'électrons et la lampe s'allume. C'est la raison pour laquelle une résistance chutrice R est prévue dans le circuit pour éviter que la lampe ne claque ou, ce qui est plus important encore, que la diode ne claque.

Lorsque la diode est en polarisation inverse, la borne négative est raccordée à l'anode et la borne positive à la cathode. Lorsque les bornes sont raccordées de cette manière, un courant très faible ou nul circule dans la diode et la lampe ne s'allume pas.

17 Diode à pointe

Il existe un deuxième type important de diode semiconductrice. Cette diode, appelée diode à cristal ou à pointe, se compose d'un fil métallique (parfois appelé chercheur[1]) en contact avec une couche de semiconducteur de type P. Lorsque la tension fournie à la diode rend le cristal positif par rapport au fil, le courant circule dans la diode, ce qui correspond à l'état de polarisation directe d'une diode à pointe.

1. Ce terme est aussi appelé MOUSTACHE.

Lorsque le potentiel appliqué rend le cristal négatif par rapport au fil, le courant ne peut plus circuler dans la diode, ce qui correspond à l'état de polarisation inverse de la diode.

La **figure 11** montre la construction d'une diode à pointe. Celle-ci se compose d'une puce monocristalline montée sur un bloc de support. Le conducteur inférieur externe de la diode est raccordé au bloc de support. L'autre moitié de la diode est formée par le fil chercheur en forme de S raccordé à l'autre bloc de support, auquel est raccordé le conducteur externe supérieur.

L'utilisation des diodes à pointe est limitée aux applications à très faible puissance.

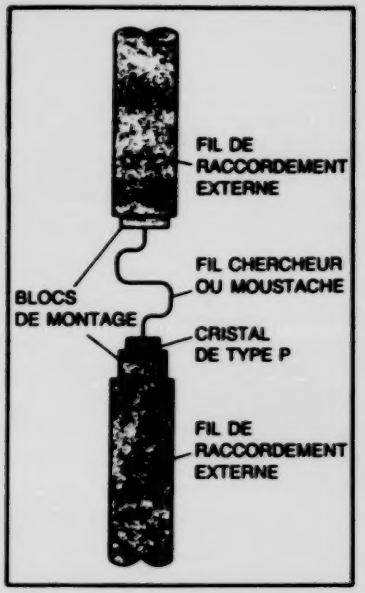


Fig. 11. Les diodes à cristal étaient utilisées dans les récepteurs radio à cristal, au début de l'ère de la radio. Le fil chercheur en forme de S assure une pression continue sur le cristal.

18 Redresseur à diode au silicium

La plupart des diodes semiconductrices actuellement utilisées comme redresseurs dans les nouveaux équipements industriels sont de type à jonction au silicium et appelées tout simplement diodes au silicium. Les redresseurs au silicium peuvent fonctionner aux températures ambiantes (soit la température de la pièce) jusqu'à 200°C (degrés Celcius) ou 392°F (degrés Fahrenheit), à des intensités de courant allant jusqu'à 400 A (ampères) et à des niveaux de tension pouvant atteindre 1 300 V. On peut envisager un montage parallèle de deux ou de plusieurs diodes pour augmenter les possibilités en courant; le montage série de deux ou de plusieurs diodes permet d'augmenter les tensions.

Les diodes au silicium ont une durée de vie très longue, car elles sont peu sensibles au vieillissement, à l'humidité ou aux variations de température. Cependant, elles peuvent facilement être endommagées par de brusques élévations de la température de la jonction à cause de pointes de courant élevé ou de température ambiante élevée. Ces redresseurs sont petits et légers et peuvent être conçus pour résister aux chocs physiques.

La diode *Zener* est un type spécial de redresseur conçu pour maintenir une tension constante dans une partie du circuit, même lorsque ce dernier est soumis à de fortes fluctuations de courant. Nous parlerons de manière plus approfondie des diodes Zener dans un autre cours.

Exercice de contrôle 2

Il est temps de faire une deuxième pause pour vérifier vos connaissances. Lorsque vous aurez terminé de répondre aux questions, comparez vos réponses aux nôtres et révisez, au besoin, les sections citées en référence.

Vos réponses

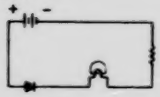
1. Lorsqu'une jonction PN est en polarisation directe, les _____ se déplacent vers le matériau de type P et les _____ se déplacent vers le matériau de type N.

1. _____

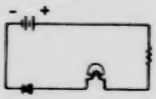
2. Dans lequel des circuits représentés ci-dessous la diode et la batterie sont raccordées de manière que la lampe NE S'ALLUME PAS?

2. _____

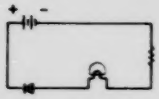
A.



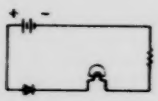
C.



B.



D.



3. Quel type de redresseur semiconducteur serait vraisemblablement utilisé dans les nouveaux équipements de votre usine?

3. _____

A. Au germanium
B. Au silicium
C. À oxyde de cuivre
D. Au sélénium

4. Vrai ou faux? Une élévation soudaine de la température ambiante dans laquelle fonctionne un redresseur au silicium augmente sa vie et sa fiabilité.

4. Vrai Faux
(Encerclez la bonne réponse)

5. Supposons que vous deviez remplacer une diode de redresseur au silicium défectueuse, et que les seules diodes disponibles aient un courant nominal plus faible. Si d'autres courants nominaux sont acceptables, vous pouvez utiliser deux ou plusieurs diodes et les raccorder _____ (en série, en parallèle).

5. _____

Dans l'espace réservé en face de chaque groupe de mots de la colonne de droite, inscrivez la lettre correspondant à la phrase suivante qui l'explique le mieux.

6. *a.* Provoque un flux de courant entre une couche de matériau de type P et une couche de matériau de type N.
   b. Un des tout premiers redresseurs semiconducteurs.
   c. Se compose d'une couche de matériau directe de type P et d'une couche de matériau de type N jointes l'une à l'autre.

6. ___ Redresseur à oxyde de cuivre
   ___ Jonction PN
   ___ Polarisation directe

Voir les réponses à la page suivante.

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 2

1. électrons — Section 15
   trous
2. *B* — Section 16, figure 10
3. *B* au silicium — Section 18
4. Faux — Section 18
   (Les semiconducteurs fonctionnent mieux en l'absence d'élévation soudaine ou excessive de la température ambiante.)

5. en parallèle — Section 18
6. ___*b*___ Redresseur à oxyde de cuivre — Section 12
   ___*c*___ Jonction PN — Section 14
   ___*a*___ Polarisation directe — Sections 14, 15

Transistors et thyristors

19 Transistors

Il existe un dispositif électronique dont vous avez probablement déjà entendu parler, le *transistor*. Le transistor est souvent considéré comme le semiconducteur équivalent de la triode à tube à vide. En fait, les transistors ont remplacé les triodes et autres tubes à vide dans la plupart des applications. Le transistor est plus robuste, ne nécessite aucun filament ni chauffage, et est plus fiable.

Le transistor est constitué de jonctions entre matériaux semiconducteurs. Un *transistor à jonction* est construit soit en intercalant une tranche de matériau négatif entre deux tranches de matériau positif, soit en intercalant une tranche de matériau positif entre deux tranches de matériau négatif **(fig. 12)**. Ces deux configurations correspondent respectivement au transistor PNP et au transistor NPN.

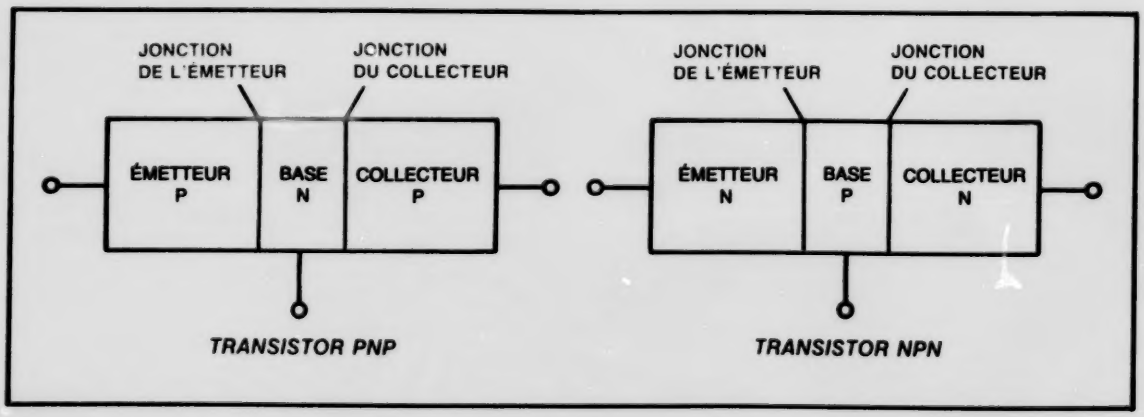


Fig. 12. Puisque la cathode d'un transistor n'a pas besoin d'être chauffée, la consommation électrique est réduite et le temps de chauffage des tubes est éliminé.

Dans les deux types de transistor, la tranche extérieure qui émet des porteurs de charge est appelée *émetteur*, tandis que l'autre tranche extérieure qui capte les porteurs de charge est appelée *collecteur*; la tranche du milieu est appelée *base*. Les trois éléments du transistor, émetteur, collecteur et base, correspondent en subs-

tance à la cathode, à l'anode et à la grille d'un tube électronique à trois électrodes.

Les porteurs de charge peuvent être soit des trous, soit des électrons.

20 Courant dans un transistor à jonction

À chaque jonction d'un transistor, comme d'une diode, la pénétration des porteurs de charge d'un matériau dans l'autre se voit opposer une résistance. Cette résistance est exercée par les porteurs de charge antagonistes se trouvant à proximité de la jonction. Cependant, un courant électrique circule dans le transistor lorsqu'une tension fournie par une source externe est convenablement appliquée au transistor. On peut raccorder un transistor dans un circuit, de plusieurs manières.

La **figure 13** représente un circuit transistorisé dans lequel la borne positive d'une source de tension externe est raccordée à la base *B* du transistor PNP et la borne négative est raccordée au collecteur *C*. (Aucune tension externe n'est appliquée à l'émetteur *E*.) **Dans ce circuit, le transistor se comporte comme une diode unijonction en polarisation inverse. Donc, puisque le transistor a une très haute résistance électrique, un courant faible circule dans le transistor et dans le circuit.**

Dans le circuit transistorisé représenté à la **figure 14**, une source externe de tension est appliquée à la *jonction de l'émetteur*, de sorte que la diode formée par l'émetteur *E* et la base *B* est en *polarisation directe*. Une autre source de tension externe est appliquée à la *jonction du collecteur*, de sorte que la diode formée par la base et le collecteur *C* est en *polarisation inverse*. Lorsqu'un transistor est

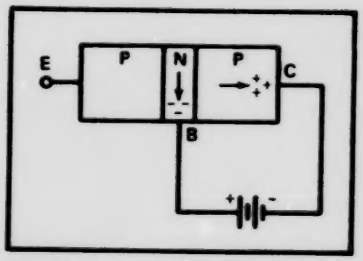


Fig. 13. On sait que cette jonction collecteur-base est en polarisation inverse parce que les P et les N ne se correspondent pas: le P (positif) de la batterie va vers le N (matériau négatif) du transistor; et le N (négatif) de la batterie va vers le P du transistor. Lorsqu'une jonction est en polarisation inverse, le faible courant qui circule n'a aucune valeur utile.

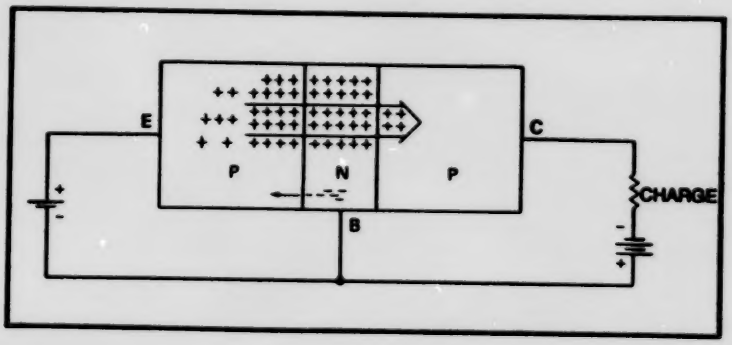


Fig. 14. Ici, la jonction collecteur-base est toujours en polarisation inverse, comme à la figure 13, mais la jonction émetteur-base est en polarisation directe. Vous observerez que la borne de tension positive est tournée vers le matériau positif, et la borne de tension négative vers le matériau négatif. Les P et les N se correspondent si bien que la jonction est en polarisation directe.

monté de cette manière, un nombre considérable de trous peut traverser la jonction de l'émetteur, de l'émetteur positif vers la base négative. Si la base est très mince, la quasi-totalité des trous qui pénètrent dans la base en traversant la jonction de l'émetteur traversent la base pour pénétrer dans la jonction du collecteur. La grande flèche indique le mouvement d'ensemble des trous. Seuls quelques trous se combinent avec des électrons libres dans la base. Lorsque les trous sont sous l'influence de la tension présente dans la jonction du collecteur, ils sont rapidement repoussés jusqu'au collecteur. En conséquence, un courant intense se déplace dans la partie du circuit contenant la charge.

21 Circuits transistorisés d'entrée et de sortie

Lorsqu'un transistor PNP est raccordé dans un circuit comme le montre la figure 14, on considère pour des raisons de commodité que le transistor est un élément à deux circuits séparés: lè *circuit d'entrée* et le *circuit de sortie*. Ces circuits sont représentés *en haut*

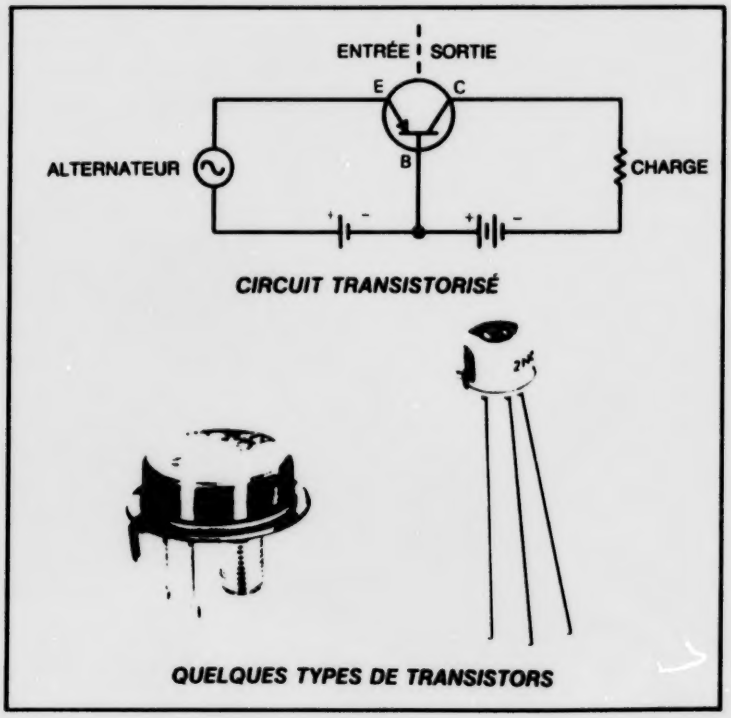


Fig. 15. L'alternateur représente un signal d'entrée pour le transistor. Le signal d'entrée est appliqué entre l'émetteur et la base, tandis que le signal de sortie apparaît entre le collecteur et la base. Certains types de transistors sont représentés.

de la **figure 15**. (*En bas* de la figure, on peut voir plusieurs transistors caractéristiques.) Le circuit d'entrée se compose d'un alternateur, de l'émetteur *E* du transistor, de la base *B* et de la batterie (qui assure la polarisation directe de la diode formée par l'émetteur et la base). Le circuit de sortie se compose d'une charge, de la base du transistor et du collecteur *C*, ainsi que d'une batterie qui assure la polarisation inverse (de la diode formée par la base et le collecteur). La base est un élément que l'on retrouve tant dans les circuits d'entrée que dans les circuits de sortie. Dans le *circuit d'entrée*, le transistor agit comme une charge alimentée par l'alternateur; dans le *circuit de sortie*, le transistor agit comme un *générateur* en forçant le passage du courant électrique dans la charge.

22 Transistor fonctionnant comme amplificateur

Nous allons maintenant voir comment le transistor peut être utilisé comme amplificateur. Lorsqu'un courant donné circule dans l'émetteur du transistor PNP de la figure 14, un pourcentage très élevé de courant (mais non la totalité du courant) circule dans le collecteur et le circuit de sortie. Le reste du courant circule dans la base et le chemin conducteur commun aux circuits d'entrée et de sortie. Puisque la jonction de l'émetteur en polarisation directe n'exerce qu'une faible opposition au passage des porteurs de charge, la résistance électrique du circuit d'entrée est faible.

Par ailleurs, puisque la jonction du collecteur en polarisation inverse exerce une forte opposition au passage des porteurs de charge, la résistance électrique du circuit de sortie est très forte. Lorsque le circuit de sortie renferme une charge à forte résistance, le rapport de la tension du circuit de sortie sur la tension du circuit d'entrée est élevé. En d'autres termes, une faible tension dans le circuit d'entrée provoque une tension supérieure (amplifiée) dans le circuit de sortie. Il s'ensuit qu'un transistor PNP raccordé dans un circuit selon le schéma reproduit à la figure 14 peut fonctionner comme un amplificateur.

Un transistor NPN fonctionne comme un amplificateur d'une manière pratiquement identique à un transistor PNP. Cependant, lorsqu'on doit remplacer un transistor PNP par un transistor NPN, il faut interchanger les bornes positives et négatives des batteries pour que le sens de la tension et du courant dans chaque partie du circuit soit inversé.

23 Construction des circuits intégrés

Le terme *circuit intégré* désigne un circuit constitué d'un dépôt de plusieurs couches minces de film sur un substrat. Ce dernier est en général un disque ou une plaquette mince de germanium ou de silicium, d'un diamètre de 2,54 cm (1 po) environ. Une fois le nombre voulu de couches successives de film déposées sur le substrat, la surface de la plaquette est divisée en un très grand nombre de petits carrés. Ensuite, grâce à certains procédés précis, chaque carré est divisé en un circuit électronique complexe renfermant de nombreux composants (notamment des diodes, des transistors, des résistances et des condensateurs). Les opérations finales consistent à couper chaque plaquette en sections de telle sorte que chaque section renferme un seul circuit, et de placer chaque section dans un boîter individuel.

Les circuits intégrés (CI) sont couramment utilisés dans toutes sortes d'équipements électriques et électroniques en raison de leur petite taille et de leur coût relativement faible par rapport aux composants individuels nécessaires pour les remplacer.

24 Thyristors

Le terme *thyristors* désigne un ensemble de dispositifs semiconducteurs à trois jonctions ou plus, ayant des caractéristiques semblables à celles des thyratrons à gaz décrits plus haut. Évidemment, dans le cas de trois jonctions ou plus, il faut prévoir quatre couches, ou plus, de semiconducteurs. Les jonctions peuvent être commutées (ARRÊT - MARCHE, ou MARCHE - ARRÊT) entre les états de conduction. Les deux thyristors les plus couramment utilisés sont le redresseur commandé au silicium (SCR) et le triac. Dans vos activités d'électricien d'entretien d'usine, vous serez sans doute amené à travailler sur ces thyristors, car ils sont couramments utilisés dans les automatismes industriels.

25 Redresseur commandé au silicium (SCR)

Un *redresseur commandé au silicium* (SCR) est en substance un dispositif PNPN à quatre couches. Il comporte trois électrodes: une

cathode, une anode et un dispositif de commande appelé gachette. La figure 16 représente le diagramme des jonctions et le symbole schématique d'un SCR. En polarisation inverse, l'anode est négative par rapport à la cathode et le redresseur commandé au silicium a une résistance interne très élevée. Ainsi, une faible proportion de courant inverse, appelé courant inverse de blocage, circule dans le redresseur PNPN. Ce courant est très faible, mais si la tension inverse dépasse la tension inverse de rupture, il augmente rapidement.

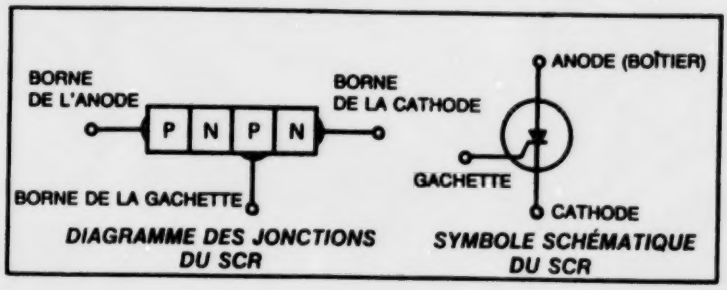


Fig. 16. Le redresseur commandé au silicium a quatre couches, soit trois jonctions PN. La gachette agit comme déclencheur pour amorcer le SCR.

Courtoisie de RCA

Lorsque la gachette du SCR est en polarisation directe, l'anode est positive par rapport à la cathode et la structure PNPN du redresseur est électriquement bistable. Cela signifie que le SCR peut avoir soit une impédance très élevée (à l'état bloqué, ou condition d'ARRÊT), soit une impédance très faible (à l'état passant, ou condition de MARCHE). À l'état bloqué, un faible courant direct, appelé courant direct d'ARRÊT, circule dans le redresseur commandé au silicium. **Lorsque la polarisation directe augmente, un niveau de tension est atteint (le courant direct augmente rapidement) et le redresseur est commuté en condition de MARCHE.** Ce niveau de tension est ce qu'on appelle la *tension d'amorçage directe*.

Le principal avantage du redresseur commandé au silicium est sa faible perte de puissance par rapport à la puissance qu'il commande. Par exemple, un redresseur type, commandé au silicium peut commander des centaines de watts avec une perte de puissance maximale inférieure à 2 W (watts).

26 Triac

Comme le redresseur commandé au silicium, le *triac* a trois électrodes: une borne principale 1, une borne principale 2 et une

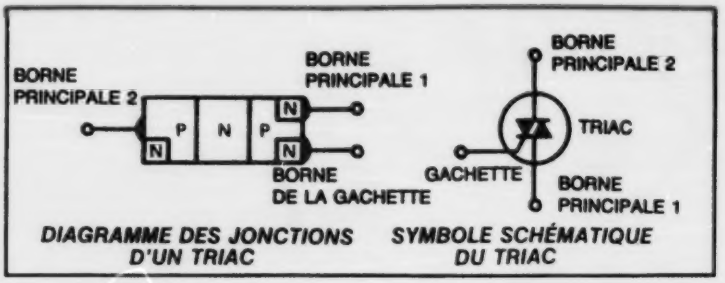


DIAGRAMME DES JONCTIONS D'UN TRIAC *SYMBOLE SCHÉMATIQUE DU TRIAC*

gachette, comme le montre la **figure 17**. Le triac peut être défini comme un ensemble de deux structures PNPN parallèles positionnées dans des directions opposées, ce qui lui confère des caractéristiques électriques symétriques dans les deux sens. La figure montre le diagramme des jonctions et le symbole schématique d'un triac.

Du fait que le triac est essentiellement constitué par deux structures PN antagonistes intégrées dans le même cristal, il fonctionne en substance comme deux redresseurs commandés au silicium montés en parallèle. Cependant, l'anode et la cathode de l'un des deux redresseurs sont raccordées respectivement à la cathode et à l'anode de l'autre redresseur, c'est-à-dire anode-cathode et cathode-anode.

Les SCR et les triacs sont utilisés dans les circuit de régulation de vitesse des moteurs, les circuits de commande d'éclairage et d'autres équipements industriels.

Exercice de contrôle 3

Il est temps de faire une troisième pause pour vérifier vos connaissances. Comparez vos réponses aux nôtres et, si nécessaire, révisez les sections citées en référence.

Vos réponses

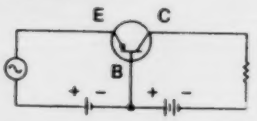
1. Dans un transistor, l'élément qui recueille les porteurs de charge est appelé _____ et l'élément du milieu est appelé _____ .

1. _____
   _____

2. Dans un certain transistor PNP, la borne négative d'une source de tension externe est raccordée au collecteur alors que la borne positive de cette même source est raccordée à la base. Le transistor est en polarisation directe si l'on raccorde une tension positive entre _____ et la base.

2. _____

3. Dans le circuit transistorisé représenté ci-dessous, la base, la batterie, l'alternateur et l'émetteur constituent:
   A. le circuit de sortie.
   B. le circuit d'entrée.
   C. le circuit de charge.
   D. le circuit d'alimentation.

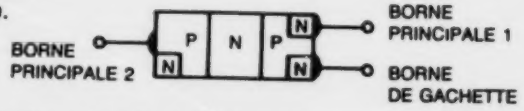


3. _____

4. Lorsqu'un transistor PNP est raccordé de la même manière que dans le circuit représenté de la question 3, quelle est la partie du transistor considérée comme appartenant à la fois au circuit d'entrée et au circuit de sortie?
   A. Le collecteur.
   B. L'émetteur.
   C. La base.
   D. La gachette.

4. _____

5. Le symbole reproduit ci-dessous désigne:
   A. un triac.
   B. un redresseur commandé au silicium (SCR).
   C. un transistor.
   D. une diode.



5. _____

Dans l'espace réservé en face de chaque groupe de mots de la colonne de droite, inscrivez la lettre correspondant à la phrase suivante qui l'explique le mieux.

6. *a.* Consiste en 2 dispositifs PN antagonistes construits dans le même cristal.
   b. Élément du transistor qui émet des porteurs de charge.
   c. Est formé en insérant une tranche de matériau de type N entre deux matériaux de type P ou une tranche de matériau de type P entre deux matériaux de type N.
   d. Élément auquel on applique une polarisation directe pour commuter le SCR (position d'ARRÊT à position de MARCHE).

6. ___ Triac
   ___ Gachette
   ___ Émetteur
   ___ Transitor à jonction

Voir les réponses à la page suivante.

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 3

1. collecteur base		Section 19
2. l'émetteur		Section 20, figure 13
3. *B* le circuit d'entrée		Section 21, figure 15
4. *C* La base		Section 21, figure 15
5. *A* un triac		Section 26, figure 17
6. *a*	Triac	Section 26
d	Gachette	Section 25
b	Émetteur	Section 19
c	Transistor à jonction	Section 19

Circuits redresseurs

27 Circuits redresseurs demi-onde

Dans le reste du cours, nous étudierons les diagrammes schématiques de quelques circuits redresseurs courants.

La **figure 18** représente des circuits redresseurs demi-onde courants. Le circuit supérieur de la figure fournit une sortie positive à la charge R_L, alors que le circuit inférieur de la figure fournit une sortie négative. Vous observerez que, dans les deux circuits, les diodes sont orientées dans des directions opposées. Le fonctionnement des deux circuits est très semblable. Pour l'instant, nous parlerons uniquement du circuit supérieur de la figure, c'est-à-dire celui qui fournit une sortie positive.

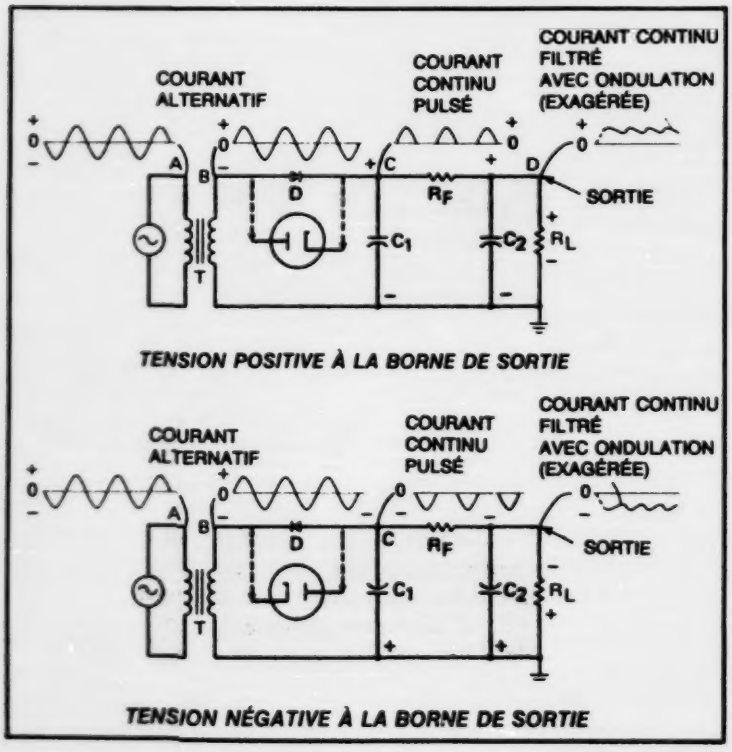
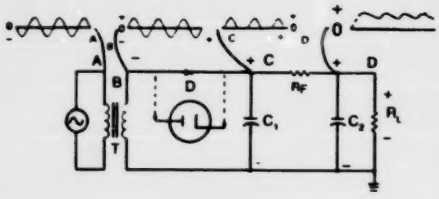


Fig. 18. Vous observerez, dans le schéma inférieur, que si l'on veut inverser la diode pour fournir une tension négative à la borne de sortie, il faut également inverser les condensateurs de filtrage C_1 et C_2. (La plaque incurvée sur le symbole du condensateur représente le côté négatif du condensateur).

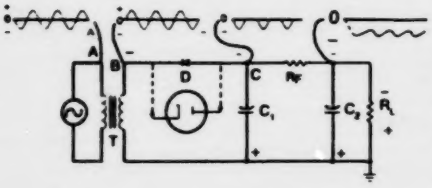


La tension d'entrée du c.a. est fournie par une source de c.a. (représentée par le cercle entourant une onde sinusoïdale) et est appliquée au primaire du transformateur *T*, comme l'indique le point *A*. La tension produite dans le secondaire est également une tension alternative comme l'indique *B*. Dans ce schéma, cette tension est directement appliquée à l'anode du redresseur à diode. Lorsque l'anode est positive, la diode est conductrice; lorsque l'anode est négative, la diode n'est pas conductrice.

En *B*, la tension est alternativement positive et négative. Cependant, la tension à la cathode oscille uniquement dans la direction positive, comme l'indique *C*. Ainsi, tous les demi-cycles négatifs de la tension d'entrée du c.a. ont été éliminés: ils ne traversent pas la diode.

Vous observerez que la forme d'onde au point C est toujours positive. Cependant, la tension n'est pas une tension continue permanente, comme celle produite par une batterie. La tension varie de zéro à un maximum positif et revient ensuite à zéro. C'est la raison pour laquelle la sortie d'un redresseur est appelée *courant continu pulsé*.

Dans la plupart des cas, la tension continue pulsée fournie par un redresseur n'est pas très utile. Pour qu'une tension continue de sortie soit utile, il faut faire passer la tension de sortie du redresseur dans un circuit spécial appelé *filtre*. La fonction du filtre est d'éliminer les pulsations de la tension continue pulsée. Nous expliquerons plus loin comment cette élimination est effectuée.



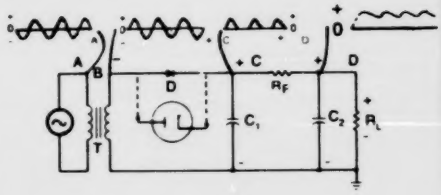
28 Effet de l'inversion de la diode

Le circuit représenté au bas de la figure 18 montre ce qui se produit lorsque la diode est inversée dans le circuit. La diode est alors conductrice pendant des demi-cycles opposés (par comparaison au premier circuit). Le circuit représenté au bas de la figure est conducteur lorsque la tension d'entrée rend la cathode négative par rapport à l'anode. L'anode est alors positive, puisqu'elle est raccordée à la partie positive du transformateur, par l'intermédiaire de la résistance de la charge. Lorsque la diode est raccordée de cette manière, la sortie du redresseur au point *C* est une tension continue pulsée négative. Cette tension est filtrée par le filtre et se retrouve dans la charge sous forme d'une tension continue permanente, avec une légère ondulation. Le bas de la résistance de la charge est mis à la terre; la sortie du filtre est donc négative par rapport à la terre.

La plupart des redresseurs fournissant une tension continue aux circuits à tubes à vide ont été conçus pour produire des tensions continues positives. Les tensions continues négatives étaient très rarement utilisées. Mais, dans les circuits semiconducteurs, on utilise indifféremment des tensions positives et des tensions négatives. Il arrive parfois qu'un équipement monobloc soit prévu pour une alimentation en tension continue positive et négative.

Les redresseurs demi-onde sont ainsi appelés parce qu'ils fournissent une sortie continue seulement pendant une moitié de la tension d'entrée, c'est-à-dire pendant le demi-cycle où l'anode est positive par rapport à la cathode. Puisque les redresseurs demi-onde ne sont pas très performants dans les applications industrielles, leur utilisation est limitée aux applications basse tension et à courant faible. Ils sont également employés dans les postes de télévision, les lecteurs de cassettes et les phonographes bon marché, ainsi que dans les récepteurs radio.

29 Filtres



La **figure 18** représente un filtre de redresseur demi-onde type. Le filtre se compose d'un condensateur d'entrée C_1, d'une résistance de filtrage R_F et d'un condensateur de sortie C_2. Le condensateur C_1 est appelé condensateur de filtrage d'entrée parce qu'il est placé à l'entrée du filtre. Le condensateur C_2, qui est placé à la sortie du filtre, est appelé condensateur de filtrage de sortie. L'autre résistance R_L représente la charge sur la diode. La fonction du filtre consiste à réduire les pulsations et à filtrer la tension continue de sortie fournie par le redresseur.

Dans le schéma supérieur, lorsque la diode est conductrice et que le point C est positif, le condensateur C_1 se charge jusqu'à la valeur de crête de la tension continue pulsée. Lorsque la conduction de la diode chute de la valeur de crête maximale à zéro, le condensateur commence à se décharger. Le condensateur se décharge dans la résistance de charge R_L et la résistance de filtrage R_F. Le condensateur C_1 sert à dériver la plus grande partie des pulsations vers la terre. De même, il sert à remplir les espaces entre les pulsations. Le condensateur C_2 sert à dériver toute fluctuation rémanente, après filtrage de la tension par C_1.

L'action de charge et de décharge effectuée par C_1 est doublée par C_2. Cependant, C_2 ne se charge pas jusqu'à une valeur de tension aussi élevée que C_1, et ne se décharge pas à une valeur aussi basse. La tension de sortie renferme encore quelques légères pulsa-

tions (appellées ondulations), comme l'indique *D*; mais cette tension est considérée comme une tension continue et peut être utilisée dans de nombreuses applications.

30 Alimentations

Nous avons dit plus haut qu'un redresseur était un dispositif qui transformait le courant alternatif en un courant continu pulsé. Une alimentation peut être définie comme un circuit (ou un groupe de circuits) conçu pour transformer un courant alternatif en un *courant* continu *filtré*. La figure 18 représente le transformateur, le redresseur et le filtre qui sont les composants indispensables d'une alimentation complète.

Dans un circuit d'alimentation, le transformateur d'entrée, c'est-à-dire la partie qui fournit au redresseur une tension alternative, est généralement appelé, en langage électronique, transformateur de puissance. Les transformateurs de puissance sont également classés comme transformateurs demi-onde ou pleine-onde, selon le type de circuit redresseur pour lequel ils ont été conçus. Les transformateurs représentés sur la figure 18 sont des transformateurs demi-onde.

31 Alimentations pleine-onde

L'alimentation pleine-onde a un rendement nettement supérieur à l'alimentation demi-onde. La **figure 19** représente le schéma d'un circuit d'alimentation pleine-onde type.

Si vous comparez ce circuit à ceux de la figure 18, vous constatez immédiatement les différences suivantes:

1. Le circuit d'alimentation pleine-onde a un transformateur de puissance équipé d'un enroulement secondaire doté d'une prise médiane de mise à la terre.
2. Le circuit d'alimentation pleine-onde comporte deux diodes au lieu d'une (comme dans le circuit d'alimentation demi-onde).
3. Le filtre de ce circuit d'alimentation est doté d'une bobine d'arrêt L_F (et non d'une résistance de filtrage) entre les deux condensateurs de filtrage.

Une bobine d'arrêt est une sorte d'inductance. Elle est formée par une bobine de fil enroulée sur un noyau en fer et ressemble beaucoup à un petit transformateur.

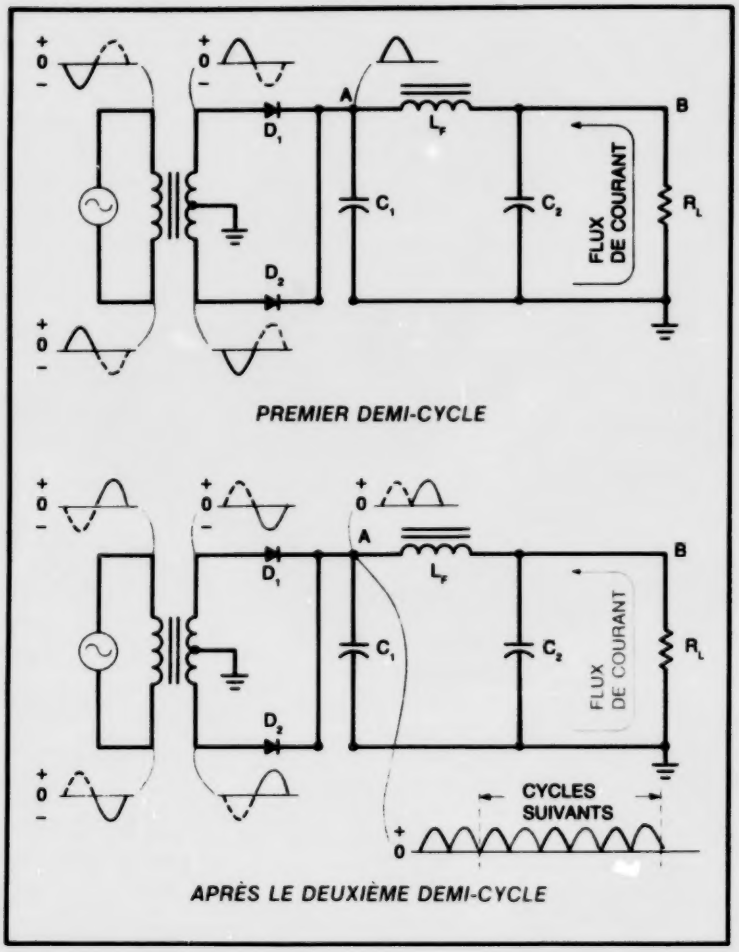
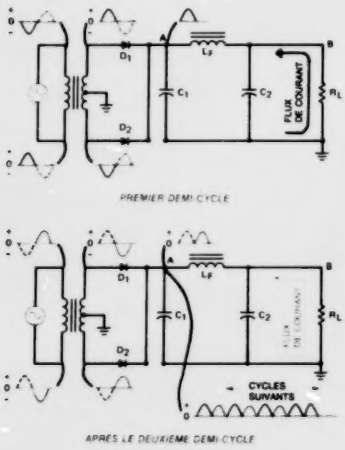


Fig. 19. Certaines alimentations ne sont pas équipées d'un filtre à condensateur en tête, comme dans ce schéma, mais la majorité des circuits d'alimentation le sont.

32 Fonctionnement du redresseur pleine-onde

Revenons à la figure 19 pour expliquer le fonctionnement du redresseur pleine-onde. Pendant la première moitié du cycle de tension alternative d'entrée, la polarité de la tension fournie au primaire rend positif le haut du secondaire du transformateur et négatif le bas du même secondaire. Elle rend également le haut positif et le bas négatif par rapport à la prise médiane. Vous observerez que les cathodes des deux diodes sont raccordées.

Dans les conditions prévalant pour le premier demi-cycle (schéma du haut), le courant circule de la cathode vers l'anode en traversant D_1; une pulsation continue positive se produit alors. Cependant, aucun courant ne traverse D_2 à ce moment-là, puisque sa cathode est positive par rapport à l'anode.



PREMIER DEMI-CYCLE

APRÈS LE DEUXIÈME DEMI-CYCLE

Le fonctionnement du circuit pendant le second demi-cycle est représenté dans la partie inférieure de la figure. Ici, la polarité de la tension alternative d'entrée est inversée, de sorte que le haut du secondaire est négatif et le bas positif. Plus important encore, le haut du secondaire est négatif et le bas positif par rapport à la terre.

Les conditions sont maintenant réunies pour que la diode D_2 soit conductrice, puisque sa cathode est négative par rapport à l'anode positive. Le courant traverse D_2, ce qui produit une pulsation continue positive.

Il convient de noter que, pendant les deux demi-cycles, la direction du flux de courant est la même. Le courant circule de la terre, en bas de la résistance de la charge, vers le point cathodique commun et, de là, vers l'anode qui est positive à ce moment précis. Le courant au point A a la même direction pendant les deux demi-cycles si bien que, pour un cycle quelconque de tension alternative d'entrée, deux pulsations de tension continue sont produites au point *A*.

Les redresseurs à deux diodes représentés sur la figure 19 produisent une tension de sortie sur les deux moitiés de la tension alternative d'entrée. C'est pour cette raison que le redresseur à deux diodes est appelé redresseur pleine-onde. De même, un circuit d'alimentation équipé d'un redresseur pleine-onde est appelé circuit d'alimentation pleine-onde.

33 Bobine de filtrage

Le circuit de filtrage représenté à la figure 19 est doté d'une bobine et non d'une résistance de filtrage; cela augmente considérablement le rendement du circuit d'alimentation. Le rendement d'un circuit d'alimentation est à peu près égal au rapport de la tension de sortie sur la tension d'entrée. Le fait que la résistance de filtrage soit remplacée par une bobine d'arrêt permet de réduire la chute de tension dans celle-ci, puisque l'action de filtrage de la bobine dépend de sa réactance, et non de sa résistance continue relativement faible. Ainsi, une plus grande proportion de la tension produite en *A* peut être fournie à la charge en *B*.

La valeur des bobines d'arrêt est exprimée en *henrys* (abréviation *H*). Dans les circuits d'alimentation, les bobines d'arrêt de 1 à 50 henrys, ou plus, sont couramment utilisées.

34 Fréquence d'ondulation

Il n'y a pas que la bobine d'arrêt qui augmente le rendement du circuit d'alimentation; le redresseur pleine-onde joue également un rôle important à cet égard. Si vous comparez les formes d'ondes de tension à l'entrée du filtre, vous constaterez que le redresseur pleine-onde produit deux impulsions pour chaque demi-onde produite par le redresseur. Si, dans chaque cas, la tension d'entrée a une fréquence de 60 Hz (hertz), ou cycles par seconde, la sortie d'un redresseur pleine-onde produit 60 pulsations de tension par seconde, ce qui équivaut également à une fréquence de 60 Hz. Le redresseur pleine-onde produit deux impulsions à chaque alternance, si bien que sa fréquence d'ondulation de sortie est de 2 x 60 Hz = 120 Hz.

La tension ayant une fréquence d'ondulation plus élevée est plus facile à filtrer et, ce, pour trois raisons. Premièrement, le condensateur se charge et se décharge moins entre les pulsations puisque celles-ci se produisent deux fois plus vite. Deuxièmement, les variations de tension à l'entrée du filtre ne sont pas aussi importantes parce que la tension de sortie du redresseur est nulle pendant une très petite partie de chaque cycle. Troisièmement, l'action de la bobine d'arrêt est deux fois plus efficace lorsque la tension a une fréquence deux fois supérieure.

35 Filtres de redresseurs pleine-onde[1]

Puisque le rendement du redresseur et du filtre est accru, la sortie du redresseur pleine-onde est une tension continue filtrée au point *B*. De plus, si des changements se produisent au niveau de la charge, la tension de sortie du redresseur pleine-onde change moins que la tension de sortie d'un redresseur demi-onde.

La stabilité de la tension de sortie est appelée régulation du circuit d'alimentation. Un circuit d'alimentation pleine-onde comme celui représenté sur la figure 19, appelé filtre à condensateur en tête, est bien réglé, alors que le circuit d'alimentation demi-onde, dont nous avons parlé précédemment, est mal réglé. On pourrait amé-

1. Ce redresseur est aussi appelé double alternance.

liorer la régulation du circuit d'alimentation de la figure 19 en ajoutant une autre bobine d'arrêt avant le condensateur d'entrée C_1, pour former ce qu'on appelle un filtre à bobine en tête. Cependant, cette amélioration de régulation se fait au détriment de la tension de sortie.

Les deux types de filtres sont reproduits sur la figure 20. Il faut se rappeler que le filtre à condensateur en tête fournit une tension de sortie plus élevée, mais une moins bonne régulation, que le filtre à bobine en tête.

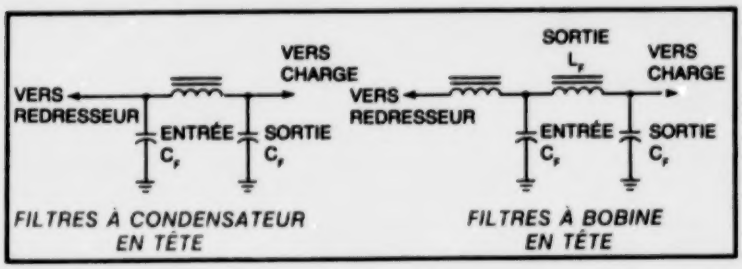
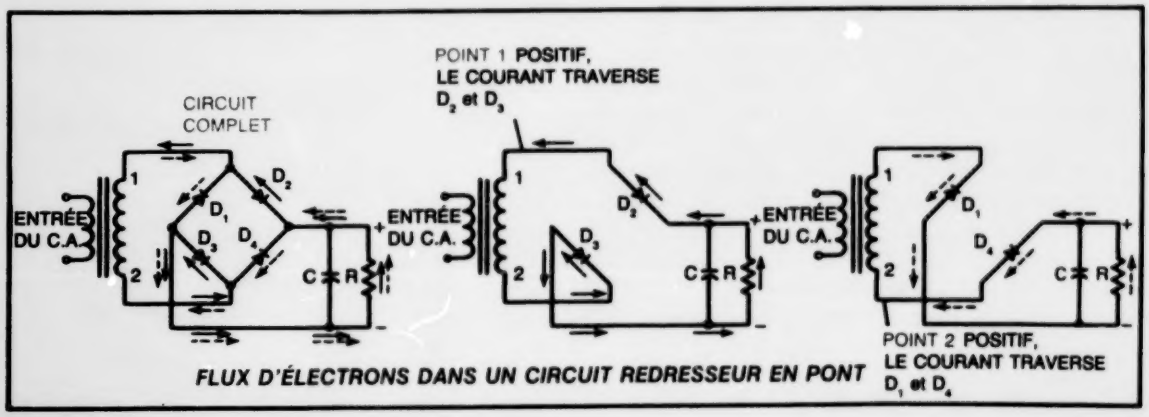


Fig. 20. Un filtre à bobine en tête à deux bobines assure une bonne régulation, mais est plus coûteux qu'un filtre à condensateur en tête.

36 Circuit redresseur en pont

La **figure 21** représente un autre type courant de circuit redresseur. Il s'agit d'un redresseur en pont pleine-onde. (Le terme *pont* est couramment utilisé en électronique: lorsque des composants sont disposés en forme de carré ou de losange, comme les quatre diodes de la figure 21, on peut dire qu'il s'agit d'un circuit en pont.)



FLUX D'ÉLECTRONS DANS UN CIRCUIT REDRESSEUR EN PONT

Le diagramme de gauche montre le flux de courant dans le circuit pendant les deux demi-cycles: les flèches pleines indiquent le flux de courant pendant un demi-cycle; les flèches en pointillés indiquent le flux de courant pendant l'autre demi-cycle. Lorsque les quatre diodes sont disposées comme dans le diagramme du haut, le courant traverse une paire de diodes (D_2 et D_3) et le circuit de charge, pendant le demi-cycle lorsque le point 1 du transformateur est positif. Le diagramme du centre indique le flux de courant pendant ce demi-cycle lorsque le point 1 est positif; vous noterez que les deux diodes dans lesquelles le courant ne passe pas ne sont pas représentées dans le diagramme, pour que vous puissiez suivre plus facilement le flux de courant.

Pendant l'autre demi-cycle, alors que le point 2 du transformateur est positif, le courant traverse l'autre paire de diodes (D_1 et D_4) et le circuit de charge, comme dans le diagramme de droite. Ici, le flux de courant est indiqué par les flèches en pointillé; encore une fois, les diodes D_2 et D_3 ne sont pas représentées pour vous permettre de suivre plus facilement le flux de courant.

Pendant les deux demi-cycles, le courant circule dans le circuit de charge dans la même direction, de sorte qu'il s'agit de courant continu dans le cas de ce même circuit de charge. Un filtre est normalement placé entre le redresseur et la charge.

L'un des avantages du redresseur en pont est qu'il permet un redressement à deux alternances sans qu'un transformateur à prise médiane sur le secondaire soit nécessaire.

Dans le circuit représenté, lorsque le point *1* du secondaire du transformateur est positif (voir le diagramme du milieu), le courant circule du point *2* vers le point *1*, en passant par le redresseur D_3, la charge R et le redresseur D_2, comme l'indiquent les flèches pleines. Alors (voir le diagramme de droite), la tension alternative s'inverse: le courant circule maintenant du point *1* vers le point *2*, en passant par le redresseur D_1, la charge R et le redresseur D_4, comme l'indiquent les flèches en pointillé.

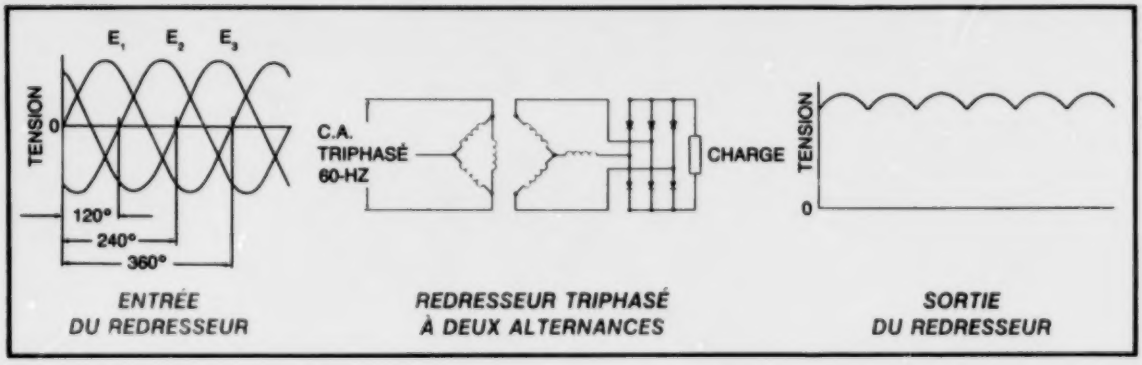
37 Circuit redresseur triphasé

Jusqu'à présent, les circuits redresseurs que nous avons traités étaient tous monophasés. Cependant, dans la pratique, de nombreux circuits redresseurs sont conçus pour fonctionner à partir de sources pleine-

onde et triphasées. Les circuits triphasés sont plus courants que les circuits biphasés, en particulier lorsqu'il s'agit de circuits redresseurs industriels. Les redresseurs alimentés par des sources de c.a. à deux (ou plusieurs) circuits de phase sont globalement appelés circuits de redresseurs polyphasés.

La **figure 22** représente un circuit redresseur triphasé type. Ce circuit comprend un transformateur dont le primaire est monté en triangle (Δ) (le symbole Δ est la lettre grecque delta), et raccordé à la source de tension alternative d'entrée triphasée, et à un secondaire monté en Y. Chacune des trois tensions alternatives d'entrée, E_1, E_2 et E_3, est déphasée de 120° par rapport aux deux autres. Six diodes sont utilisées dans ce circuit.

Fig. 22. Même avant le filtrage, la tension de sortie (schéma du haut) semble déjà relativement filtrée; elle se situe toujours à un niveau nettement supérieur à 0 V.



Nous n'allons pas aborder la manière assez compliquée dont les diodes sont conductrices; les formes d'ondes d'entrée et de sortie sont néanmoins indiquées dans le diagramme. Si chaque tension alternative d'entrée a une fréquence de 60 Hz, la fréquence du primaire du transformateur est alors égale à 3 x 60 Hz = 180 Hz. À la sortie du redresseur à deux alternances, la fréquence d'ondulation du filtre est égale à 2 x 180 Hz = 360 Hz. Cette haute fréquence d'ondulation facilite le filtrage de la tension de sortie d'un redresseur triphasé à deux alternances. La charge et le filtre sont représentés par un bloc unique dans le diagramme du circuit.

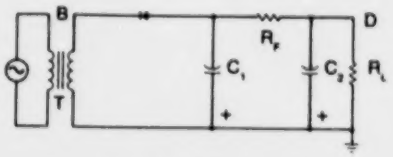
Au sujet de la tension de sortie triphasée, il convient de noter que, tant que le redresseur fonctionne, la tension ne chute jamais à zéro. La chute entre crêtes ne dépasse *jamais* 0,866 (ou 86%) du maximum. Donc, si la tension maximale du secondaire représenté à la figure 22 est égale à 300 V, la tension minimale est égale à 260 V. Ce facteur, combiné à la haute fréquence d'ondulation, améliore le rendement de la tension fournie par un redresseur de filtrage triphasé.

Exercice de contrôle 4

Vous allez maintenant faire une pause de quelques minutes qui vous permettra de revoir certains points-clés avant de répondre au questionnaire personnel. Comparez vos réponses aux nôtres et révisez, au besoin, les notions qui ne vous sont pas claires.

Vos réponses

1. Dans le diagramme suivant, la tension continue à la borne de sortie D est (positive, négative) _____ lorsque le point B devient (positif, négatif) _____ .

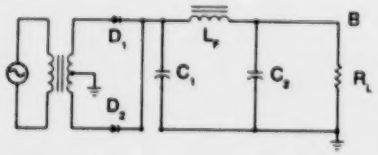


1. _____
_____

2. Dans le diagramme reproduit à la question 1, les condensateurs C_1 et C_2 et la résistance R_F agissent ensemble comme:
   A. une source de tension alternative.
   B. une source de tension continue.
   C. un filtre.
   D. un alternateur.

2. _____

3. Quel est le type de circuit redresseur représenté par le circuit suivant?



   A. Demi-onde
   B. Pleine-onde
   C. Triphasé
   D. Polyphasé

3. _____

4. Dans le circuit représenté à la question 3, le composant qui remplace la résistance de filtrage est:
   A. une bobine d'arrêt
   B. un condensateur.
   C. un transformateur.
   D. une charge.

4. _____

5. Quelle est la valeur de la fréquence d'ondulation à la sortie d'un redresseur demi-onde?
   A. 30 Hz
   B. 60 Hz
   C. 120 Hz
   D. 360 Hz

5. _____

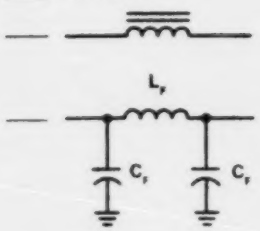
6. Quel est le type de redresseur pleine-onde qui NE nécessite PAS de transformateur à prise médiane?

6. _____

Voir les réponses à la page suivante.

Dans l'espace réservé en face de chaque illustration de la colonne de droite, inscrivez la lettre correspondant à l'une des phrases suivantes qui l'explique le mieux.

7. *a*. Fournit une tension de sortie plus élevée qu'un filtre à bobine en tête.
   b. Symbole de la bobine d'arrêt utilisée dans un filtre de circuit d'alimentation.
   c. Fréquence d'ondulation de filtrage pour un redresseur en pont 60 Hz pleine-onde.
   d. Type de montage de transformateur que l'on trouve dans les circuits redresseurs triphasés.

7. ___ Δ
   ___ 120 Hz
   ___ 

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 4

1. négative négatif	Sections 27, 28 Section 18	5. *B* 60 Hz 6. Le redresseur en pont	Section 34 Section 36
2. *C* un filtre	Section 29	7. *d*	Section 37
3. *B* pleine-onde	Section 31, figure 19	*c* 120 Hz	Section 34
4. *A* une bobine d'arrêt	Section 33	*b*	Section 33, figures 19, 20
		a	Section 35, figure 20

Examen personnel

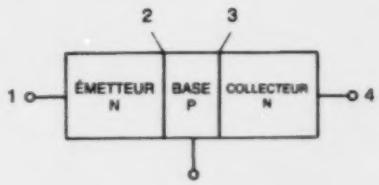
Lisez attentivement chacune des phrases suivantes et assurez-vous que vous en comprenez bien le sens. Chaque phrase est suivie de quatre mots ou groupes de mots dont un seul est correct. Faitex un X sur la lettre correspondante à votre réponse.

1. Dans le symbole schématique désignant une diode semiconductrice, la flèche pointe vers:

   A. la jonction PN.
   B. la charge d'espace.
   C. la cathode.
   D. l'anode.

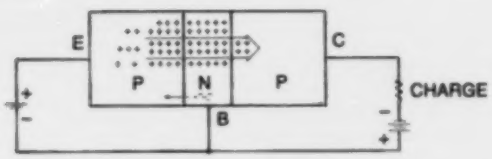
2. Dans le schéma suivant, quel point indique l'emplacement de la jonction du collecteur?

   A. 1
   B. 2
   C. 3
   D. 4



3. Dans le schéma du transistor PNP reproduit ci-dessous, la jonction du collecteur est en polarisation inverse et un faible courant y circule.
   Si l'on raccorde une autre source de tension externe de telle sorte que la partie positive de la source se dirige vers l'émetteur et la partie négative, vers la base (comme le montre le schéma), le courant du collecteur:

   A. reste inchangé.
   B. devient nul.
   C. augmente.
   D. diminue.

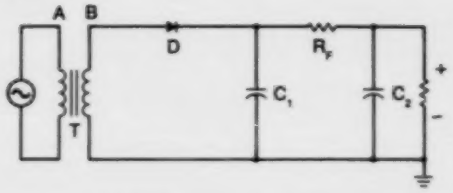


4. Un transistor PNP utilisé comme amplificateur peut être remplacé par un type équivalent de transitor NPN en:

   A. interchangeant les bornes de l'émetteur et du collecteur.
   B. interchangeant les bornes de la batterie.
   C. court-circuitant la base et le collecteur.
   D. court-circuitant la base et l'émetteur.

5. Dans le circuit redresseur reproduit ci-dessous, on peut obtenir une tension de sortie continue négative en inversant:

   A. le transformateur.
   B. la résistance de la charge.
   C. l'alternateur.
   D. la diode.



6. Pour qu'un redresseur fournisse une tension continue de sortie filtrée, il faut prévoir:

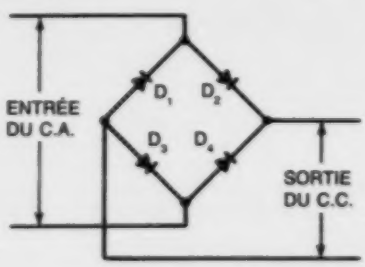
   A. un filtre.
   B. une diode.
   C. un transformateur.
   D. un courant de secteur.

7. Le redresseur dans lequel le courant circule dans la charge en traversant une diode pendant une moitié du cycle du c.a. et une seconde diode pendant l'autre demi-cycle est un redresseur _____ .

   A. demi-onde
   B. pleine-onde
   C. régulé
   D. non régulé

8. Si vous trouviez le diagramme reproduit ci-dessous dans le schéma d'un circuit d'alimentation, vous en déduiriez qu'il s'agit:

   A. d'un redresseur en pont.
   B. d'un redresseur de filtrage.
   C. d'un redresseur à diode.
   D. d'un redresseur en cage d'écureuil.



9. Lequel des types de redresseurs suivants est le plus facile à filtrer?

   A. Monophasé demi-onde.
   B. Monophasé à deux alternances.
   C. Monophasé en pont.
   D. Triphasé à deux alternances.

10. La fréquence d'ondulation à la sortie d'un redresseur 60 Hz triphasé à deux alternances est égale à:

    A. 60 Hz.
    B. 120 Hz.
    C. 180 Hz.
    D. 360 Hz.

Les réponses sont données à la page 336.

Redressement et dispositifs électroniques

AF0206

(Lexiques)

Français	Anglais
Amorçage	Breakover
Automatismes industriels	Industrial controls
Barrière de potentiel	Voltage barrier
Bloc de support	Base block
Bobine d'arrêt	Choke
Bobine de filtrage	Filter choke
Bore	Boron
Charge d'espace	Space charge
Chercheur (fil)	Cat's whisker
Circuit redresseur en pont	Bridge rectifier circuit
Circuit transistorisé	Transistor circuit
Collecteur	Collector
Commande d'éclairage	Lighting control
Condensateur de filtrage	Filter capacitor
Courant continu pulsé	Pulsating direct current
Courant de coupure	Cut-off current
Courant de plaque	Plate current
Courant direct	Forward current
Courant filtré	Smooth current
Courant inverse de blocage	Reverse blocking current
Courant pulsé	Pulsating current
Court-circuiter	Short (to)
Déclencheur	Trigger device
Demi-onde (redresseur)	Half-wave
Diode à jonction	PN-junction diode
Diode à pointes	Point-contact diode
Diode à tube à vide	Vacuum tube diode
Diode semiconductrice	Semiconductor diode
Diode Zener	Zener diode
Dopage	Doping
Double alternance	Full-wave
Élément	Cell
Élément de redresseur	Rectifying element
Élément dopant	Dopant
État bloqué	Forward blocking state
État passant	Forward conducting state
Filtres à bobine en tête	Choke input filter
Fréquence d'ondulation	Ripple frequency
Gachette	Gate
Gradient de potentiel	Potential gradient
Grille de commande	Control grid
Jonction PN	PN junction
Lueur violacée	Purplish glow
Milliampèremètre	Milliammeter
Monocristallin	Single crystal
Osciller	Swing (to)
Plaque	Plate

Anglais	Français
Anode	Plaque anode
Base block	Bloc de support
Bias	Polarisation
Boron	Bare
Breakdown voltage	Tension de rupture
Breakover	Amorçage
Bridge rectifier circuit	Circuit redresseur en pont
Cat's whisker	Chercheur (fil)
Cell	Élément
Charge carrier	Porteur de charge
Choke	Bobine d'arrêt
Choke input filter	Filtre à bobine en tête
Collector	Collecteur
Copper oxide rectifier	Redresseur à oxyde de cuivre
Control grid	Grille de commande
Current-limiting resistor	Résistance de limitation
Current surge	Pointe de courant
Cut-off current	Courant de coupure
Dopant	Élément dopant
Doping	Dopage
Electron tube	Tube électronique
Filter capacitor	Condensateur de filtrage
Filter choke	Bobine de filtrage
Filter resistor	Résistance de filtrage
Forward bias	Polarisation directe
Forward blocking state	État bloqué
Forward breakover voltage	Tension d'amorçage directe
Forward conducting state	État passant
Forward current	Courant direct
Full-wave	Double alternances
Full-wave rectifier	Redresseur onde pleine
Gas triode	Triode à gaz
Gaseous tube	Tube à gaz
Gate	Gachette
Grid-controlled triode	Triode à grille commandée
Grid-controlled gas triode	Triode à gaz à grille commandée
Half-wave	Demi-onde (redresseur)
Hal-wave rectifier	Redresseur (demi-onde)
High-vacuum tube	Tube à vide poussé
Industrial controls	Automatismes industriels
Lighting control	Commande d'éclairage
Mercury vapor rectifier	Redresseur à vapeur de mercure
Milliammeter	Milliampèremètre
PN-junction diode	Diode à jonction PN
Plate	Plaque

Français	Anglais
Plaque	Anode
Plaquette	Wafer
Pointe (de courant)	Surge (of current)
Pointe de courant	Current surge
Polarisation	Bias
Polarisation directe	Forward bias
Polarisation inverse	Reverse bias
Porteur de charge	Charge carrier
Prise	Tap
Puce monocristalline	Single crystal chip
Redressement	Rectification
Redresseur	Rectifier
Redresseur à oxyde de cuivre	Copper oxide rectifier
Redresseur à vapeur de mercure	Mercury vapor rectifier
Redresseur à vide	Vacuum rectifier
Redresseur pleine onde	Full-wave rectifier
Redresseur commandé au silicium (SCR)	Silicon-controlled rectifier (SCR)
Redresseur demi-onde	Half-wave rectifier
Redresseur semiconducteur	Semiconductor rectifier
Résistance chutrice	Current-limiting resistor
Résistance de filtrage	Filter resistor
Semiconducteur	Semiconductor
Semiconducteur (à)	Solid-state
Tension d'amorçage directe	Forward breakover voltage
Tension de rupture	Breakdown voltage
Tension permanente	Steady voltage
Thyratron	Thyratron
Transistor unijonction	Single junction transistor
Triac	Triac
Triode	Triode tub
Triode à gaz	Gas triode
Triode à gaz à grille commandée	Grid-controlled gas triode
Triode à grille commandée	Grid-controlled triode
Tube à gaz	Gaseous tube
Tube à vide	Vacuum tube
Tube à vide poussé	High-vacuum tube
Tube électronique	Electron tube

Anglais	Français
Plate current	Courant de plaque
PN junction	Jonction PN
Point-contact diode	Diode à pointes
Potential gradient	Gradient de potentiel
Pulsating current	Courant pulsé
Pulsating direct current	Courant continu pulsé
Purplish glow	Lueur violacée
Rectification	Redressement
Rectifier	Redresseur
Rectifying element	Élément de redresseur
Reverse bias	Polarisation inverse
Reverse blocking current	Courant inverse de blocage
Ripple frequency	Fréquence d'ondulation
Semiconductor diode	Diode semi conductrice
Semiconductor rectifier	Redresseur à semi-conducteur
Short (to)	Court-circuiter
Silicon-controlled rectifier (SCR)	Redresseur commandé au silicium (SCR)
Single crystal	Monocristallin
Single crystal chip	Puce monocristalline
Single junction transistor	Transistor unijonction
Smooth current	Courant filtré
Solide-state	À semiconducteur
Semiconductor	Semiconducteur
Semiconductor diode	Diode semiconductrice
Space charge	Charge d'espace
Steady voltage	Tension permanente
Surge (of current)	Pointe (de courant)
Tap	Prise
Thyratron	Thyratron
Transistor circuit	Circuit transistorisé
Trigger device	Déclencheur
Voltage barrier	Barrière de potentiel
Vacuum tube diode	Diode à tube à vide
Zener diode	Diode Zener
Swing (to)	Osciller
Wafer	Plaquette
Vacuum rectifier	Redresseur à vide
Triac	Triac
Triode tube	Triode
Vacuum tube	Tube à vide

Distribution de l'énergie électrique

AF0207

Distribution de l'énergie électrique

Objectifs d'enseignement

Le présent cours va vous faire voyager à l'intérieur d'un réseau électrique. Vous partirez de la charge électrique et remonterez le flux de courant jusqu'à la source, soit la centrale électrique. Votre voyage s'effectuera en deux étapes. Au cours de la première étape, l'électricité est distribuée à l'intérieur de l'usine; au cours de la deuxième, elle est distribuée de la centrale électrique vers l'usine. Au cours des deux étapes, nous vous parlerons des équipements et des circuits utilisés.

À la fin du cours, vous devriez être en mesure:

- *D'expliquer la différence entre les lignes d'alimentation et les dérivations.*
- *De décrire les différents systèmes utilisés pour la distribution de l'électricité à l'intérieur d'une usine.*
- *De reconnaître l'appareillage d'utilisation et de le désigner.*
- *De parler de l'application des transformateurs.*
- *De désigner et de décrire les applications de divers types de canalisations.*
- *De faire la distinction entre les panneaux de distribution et les panneaux de commande.*
- *De parler du réseau électrique d'une compagnie d'électricité.*
- *De décrire les étapes de la production de l'électricité.*

Table des matières

Le réseau électrique dans son ensemble

Description générale 259
Réseaux électriques secondaires 260
Terminologie 261
Exercice de contrôle 1 263

L'installation électrique d'une usine

Comparaison avec les installations résidentielles 264
Appareillage d'utilisation 264
Dérivations 265
Dérivation de moteur 266
Lignes d'alimentation 268
Transformateurs 268
Transformateurs extérieurs 269
Exercice de contrôle 2 270
Canalisations et conducteurs 271
Chemins de câbles et caniveaux auxiliaires 271
Gaines de distribution et canalisations des câbles 271
Panneaux de commande 273
Des lignes d'alimentation aux dérivations 274
Réseaux de distribution pour installations industrielles 275
Réseau de distribution en étoile simple classique 276
Réseau de distribution en étoile primaire 277
Réseau en étoile primaire bouclé 278
Exercice de contrôle 3 279

Le réseau électrique d'une compagnie d'électricité

Transformateurs de distribution (sur poteau) 280
La sous-station 281
Distribution aérienne et souterraine 282
Le générateur d'électricité 283
Production de la vapeur 284
Sources d'énergie 285
Le réseau en bref 287
Exercice de contrôle 4 289

Examen personnel 290

Lexiques 292

Le réseau électrique dans son ensemble

1 Description générale

Un réseau électrique complet commence à la source, ou centrale électrique, là où l'électricité est produite. Il se termine à la charge électrique, là où l'électricité est utilisée. Un réseau électrique ressemble à un système de distribution d'eau, comme le montre la figure 1.

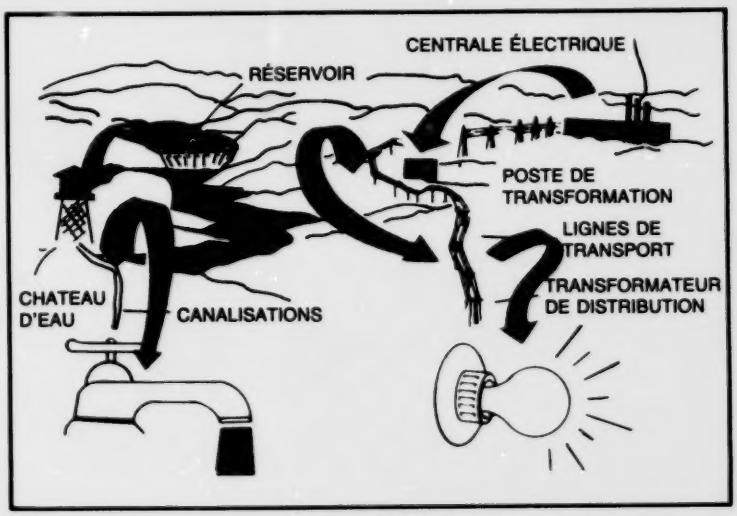


Fig. 1. Comme le montre cette figure, tous les composants d'un réseau électrique peuvent être comparés à ceux d'un système de distribution d'eau. Par exemple, lorsqu'on ouvre un robinet, l'eau circule dans les tuyaux. Un peu de la même manière, lorsqu'on allume la lumière, le courant passe dans les fils.

La source d'eau est le réservoir tandis que le robinet est le point d'utilisation de l'eau. L'eau circule à différentes pressions dans une tuyauterie. Le débit d'eau se mesure généralement en mètres cubes/seconde. Le courant électrique circule dans des fils (appelés conducteurs) à différentes pressions électriques (appelées tensions). Le débit du flux de courant se mesure en ampères.

La pression de l'eau varie à certaines étapes du circuit, notamment dans les centrales de pompage et dans les châteaux d'eau. La pression électrique ou tension varie également à certaines étapes du circuit. Ces variations de tension sont produites par des appareils appelés transformateurs. Comme vous pouvez le constater, les réseaux de distribution d'eau et d'alimentation électrique sont très semblables.

2 Réseaux électriques secondaires

Voyons maintenant de manière plus détaillée à quel point les réseaux de distribution d'eau et d'alimentation électrique se ressemblent. Les deux réseaux sont subdivisés en systèmes plus petits appelés *réseaux secondaires*. La **figure 2** montre les principaux réseaux secondaires de distribution d'eau et d'alimentation électrique et les désigne de façon individuelle.

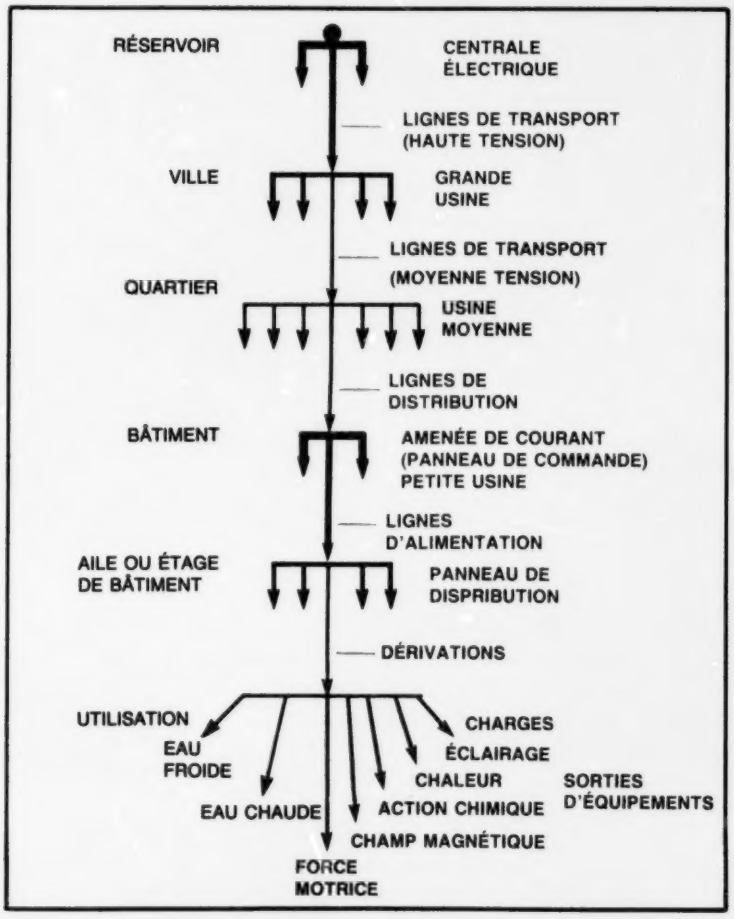


Fig. 2. Le réseau de tuyauterie d'un système de distribution d'eau et celui des fils d'un réseau électrique peuvent être comparés au tronc et aux branches d'un arbre. Les lignes de transport correspondent au tronc et les dérivations correspondent aux branches de l'arbre. Pour simplifier, nous n'avons pas représenté les réseaux de distribution à l'intérieur de grandes et de moyennes usines.

Le trajet de l'électricité montré sur la figure 2 est divisé en deux parties par une ligne de démarcation appelée ligne d'amenée de courant. Dans la première étape, soit de la centrale électrique à l'amenée de courant, le circuit électrique devient la responsabilité de la compagnie d'électricité. Dans la seconde partie, soit de l'amenée de courant aux charges électriques, le circuit électrique devient la responsabilité de l'électricien d'entretien.

Ce cours se divise en deux parties qui correspondent aux deux étapes du «voyage» que vous allez entreprendre. Reportez-vous à la figure 2. Vous allez vous promener dans le réseau électrique en sens inverse, en remontant le trajet du courant jusqu'à la source. Votre promenade commencera par les charges électriques que vous connaissez. Elle vous fera ensuite remonter vers la centrale d'électricité.

3 Terminologie

Avant de commencer notre voyage, nous allons définir certains termes. Vous les comprendrez mieux lorsque vous les rencontrerez de nouveau dans le cours. Au besoin, vous pourrez consulter la liste de référence ci-dessous.

appareillage d'utilisation: appareillage qui utilise ou consomme de l'énergie électrique pour des applications mécaniques, chimiques, ou pour le chauffage, l'éclairage ou d'autres usages semblables.

canalisation: toute conduite exclusivement réservée au passage des fils, des câbles ou des barres omnibus.

commande (panneau de): grand panneau simple, charpente métallique ou ensemble de panneaux. Dans ce panneau, sont montés les interrupteurs, les disjoncteurs et autres dispositifs de protection, les barres omnibus et généralement des appareils de mesure. Ces panneaux sont le plus souvent accessibles par l'arrière et l'avant. Ils ne sont pas conçus pour être installés dans des armoires.

contrôleur: dispositif ou groupe de dispositifs régissant la puissance électrique fournie à l'appareil auquel il est relié.

dérivation: ensemble de conducteurs placés entre le dernier dispositif de protection contre les surintensités du circuit et la prise ou la charge.

dispositif: appareil d'un système électrique qui transporte mais n'utilise pas de l'énergie électrique.

distribution (panneau de): panneau simple ou groupe de panneaux conçu pour former un seul panneau. Celui-ci comprend des barres omnibus et des disjoncteurs automatiques de protection contre les surintensités; il peut être muni d'interrupteurs pour la commande de circuits d'éclairage, de chauffage ou d'alimentation; il est accessible par l'avant seulement.

équipement: terme général désignant le matériel, les raccords, les dispositifs, les appareils électriques, les appareils d'éclairage et les autres appareils utilisés dans une installation électrique.

ligne d'alimentation: tous les conducteurs d'un circuit placés entre l'équipement de branchement et le dernier dispositif de protection contre les surintensités des dérivations.

prise de courant: point d'une installation électrique où le courant est prélevé pour alimenter un appareillage d'utilisation.

sectionneur: dispositif ou groupe de dispositifs servant à couper le courant des conducteurs d'un circuit.

Même si vous rencontrez d'autres termes tout au long du cours, les termes définis ci-dessus sont ceux que vous aurez à utiliser le plus souvent dans vos études.

Exercice de contrôle 1

Vous allez maintenant faire une petite pause pour revoir quelques points-clé. Si vos réponses sont différentes des nôtres, vous trouverez l'explication en vous reportant à la section indiquée en face de chaque réponse.

Dans l'espace réservé en face de chaque mot ou groupe de mots de la colonne de droite, inscrivez la lettre correspondant au mot ou groupe de mots qui l'expliquent le mieux. Chaque lettre ne doit être utilisée qu'une seule fois.

Vos réponses

1. *a.* Réservoir
   b. Canalisation
   c. Pompe à eau
   d. Pression d'eau
   e. Débit d'eau
   f. Robinet

1. ___ Transformateur
___ Ampère
___ Interrupteur
___ Fils
___ Centrale électrique
___ Tension

2. La ligne de démarcation entre le réseau électrique d'une usine et celui de la compagnie d'électricité est appelée _____ .

2. _____

3. Dans un réseau électrique, tout élément qui transporte de l'énergie électrique sans l'utiliser est appelé _____ .

3. _____

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 1

1. *c* Transformateur — 2. amenée de courant — Section 2
   e Ampère
   f Interrupteur — 3. dispositif — Section 3
   b Fils
   a Centrale électrique
   d Tension — Section 1, figure 1

L'installation électrique d'une usine

4 Comparaison avec les installations résidentielles

Bien que les installations électriques commerciales et industrielles ressemblent aux installations résidentielles, les variantes sont nombreuses en raison de leur plus grande demande en puissance électrique. Les tensions et les courants des installations commerciales et industrielles sont, dans certains cas, plus élevés que ceux des installations résidentielles.

Les besoins en puissance électrique d'une usine sont supérieurs aux besoins résidentiels du fait qu'un grand nombre d'appareils d'éclairage et d'équipements fonctionnent en même temps et en continu pendant plusieurs heures. La plupart des équipements résidentiels ne fonctionnent que pendant de courtes périodes. De plus, ces équipements ne fonctionnent généralement pas tous en même temps.

Les équipements électriques industriels d'une usine sont généralement conçus pour un service intensif. En effet, ils tolèrent des courants élevés pendant des périodes prolongées, sans risque de panne. Il s'agit d'équipements plus gros et plus encombrants que les appareils de votre maison. Les disjoncteurs résidentiels, par exemple, sont de type enfichable à faible puissance, tandis que, dans les usines, on trouve des disjoncteurs boulonnés pour service intensif.

5 Appareillage d'utilisation

L'appareillage d'utilisation est l'ensemble des appareils (moteur ou radiateur, par exemple) qui utilisent ou consomment une puissance électrique. On parle également de *charge électrique* ou, tout simplement, de *charge*. La plupart des charges convertissent ou transforment l'énergie électrique en lumière, en chaleur ou en énergie mécanique; certaines charges convertissent l'énergie électrique en énergie magnétique, chimique ou autre. En tout cas, la charge est la destination finale du courant électrique qui circule dans l'installation. Souvenez-vous des différents types de charges déjà mentionnées dans les cours précédents. Parmi les charges courantes, on peut citer notamment les moteurs, les appareils d'éclairage et les radiateurs. Ces charges sont alimentées en électricité par des prises de courant, elles-mêmes raccordées aux dérivations de l'usine.

6 Dérivations

Maintenant que nous avons passé en revue les charges électriques, continuons notre voyage en étudiant de plus près les dérivations. Vous vous souvenez qu'une dérivation est constituée de conducteurs ou de fils placés entre le dernier dispositif de protection contre les surintensités, soit un fusible ou un disjoncteur, et la charge. Il existe deux types principaux de dérivations dans une usine: le type universel et le type simple.

Les *dérivations universelles* transportent l'électricité vers les prises de courant standard et les prises-lumière. Elles sont semblables aux circuits d'une maison utilisés pour l'alimentation électrique générale et l'éclairage. Les différences entre les circuits universels industriels et résidentiels seront expliquées dans d'autres cours. Nous allons maintenant nous déplacer de la charge vers le dernier dispositif de protection contre les surintensités en passant par la dérivation. Les derniers dispositifs de protection contre les surintensités sont logés dans les panneaux, comme celui représenté à la **figure 3**. Ces panneaux constituent le point de départ des dérivations. Ils se trouvent là où finit la ligne d'alimentation. Vous constaterez que nous avons suivi le flux de courant de la charge à la dérivation, jusqu'au dispo-

Courtoisie de Westinghouse Electric Corporation

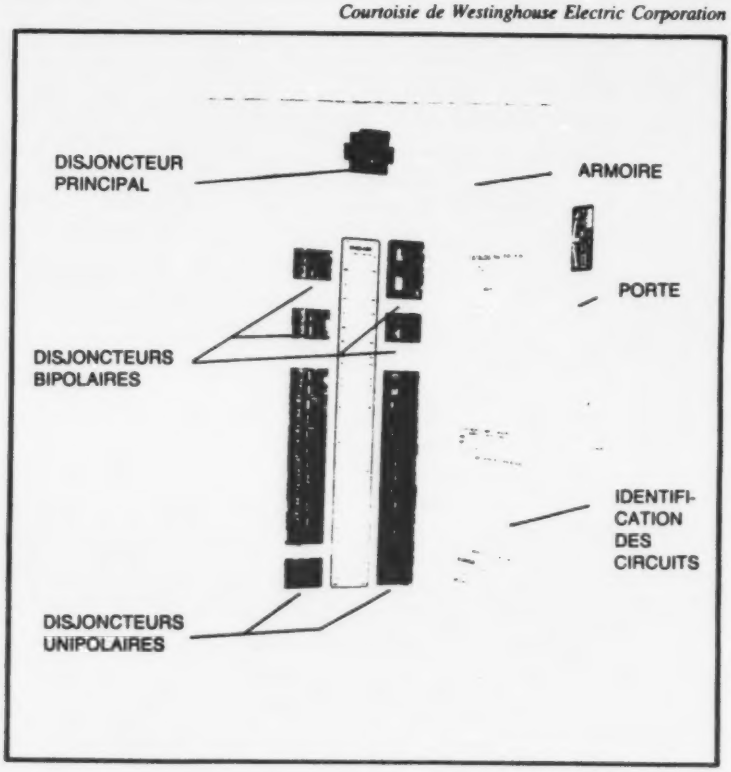


Fig. 3. Ce panneau de 200 A comprend 48 emplacements de disjoncteurs. Neuf emplacements sont libres, dix sont occupés par les disjoncteurs bipolaires et vingt-neuf, par les disjoncteurs unipolaires.

sitif de protection contre les surintensités, pour en arriver à la ligne d'alimentation. Comme les dérivations sont très importantes, étudions-les de manière plus détaillée.

Plusieurs prises-lumière ou prises de courant peuvent être installées sur une dérivation universelle. Leur nombre dépend de l'utilisation et de l'intensité du courant admissible des conducteurs et des dispositifs du circuit. Les dérivations *simples* sont nécessaires à la plupart des équipements électriques d'une usine. Les dérivations universelles qui viennent d'être mentionnées sont des exceptions.

Une dérivation simple est généralement nécessaire à chaque équipement, pour deux raisons: 1) les besoins en électricité de chaque appareil doivent être assurés et 2) l'équipement et les conducteurs correspondants de la dérivation doivent être convenablement protégés contre les défauts dans l'installation. Dans le secteur résidentiel, les dérivations simples alimentent les cuisinières électriques et les sécheuses, pour les mêmes raisons. Presque tous les circuits de moteur sont des circuits simples.

7 Dérivation de moteur

La **figure 4** représente, sous forme de diagramme synoptique, une dérivation de moteur. Elle se compose d'un sectionneur, d'un démarreur et d'un moteur. On y trouve également un diagramme schématique de la dérivation. Les lignes d'alimentation transportent l'électricité vers un sectionneur. Après le sectionneur, se trouvent trois fusibles qui protègent le circuit contre les courts-circuits et les mises à la terre accidentelles. Les fusibles et le sectionneur peuvent être

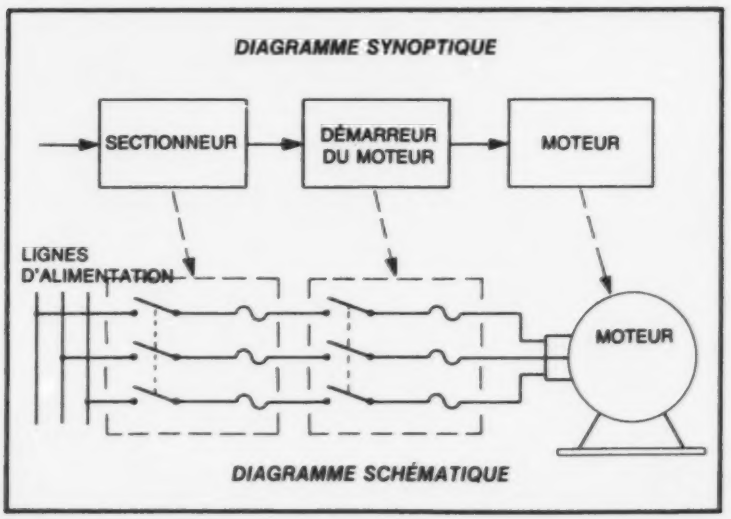


Fig. 4. Le diagramme synoptique et le diagramme schématique représentent le même circuit de commande du moteur. Le diagramme synoptique montre les composants physiques de l'équipement, alors que le diagramme schématique montre tous les composants électriques.

de type protégé à fusion rapide ou de type sécurité. Le démarreur du moteur est un autre type d'interrupteur: il sert à faire démarrer et à arrêter le moteur. Trois fusibles différents assurent la protection du moteur contre les surcharges électriques. Le démarreur du moteur et les fusibles de protection sont souvent logés dans la même armoire.

La protection d'une dérivation contre les courts-circuits peut être assurée par des fusibles ou des disjoncteurs montés sur un panneau de distribution. Lorsque la protection est assurée par des fusibles, ces derniers sont souvent intégrés au sectionneur, comme le montre la figure 4.

La protection contre les courants de surcharge peut être assurée par quatre dispositifs différents, soit des *fusibles*, des *disjoncteurs*, des *rupteurs thermiques* ou des *relais thermiques*. Les disjoncteurs thermiques de protection contre les surcharges peuvent être incorporés dans certains petits moteurs, mais ils font généralement partie du démarreur de moteur.

Lorsqu'une dérivation de moteur se présente comme celle de la figure 4, elle commence à la boîte du sectionneur. Cette boîte contient le dernier dispositif de protection du circuit. Lorsqu'une dérivation de moteur commence au panneau de distribution, ce dernier est généralement différent de celui utilisé pour les circuits universels. La **figure 5** représente le montage de deux panneaux différents. Dans tous les cas, les circuits ou les lignes d'alimentation finissent là où les dérivations commencent.

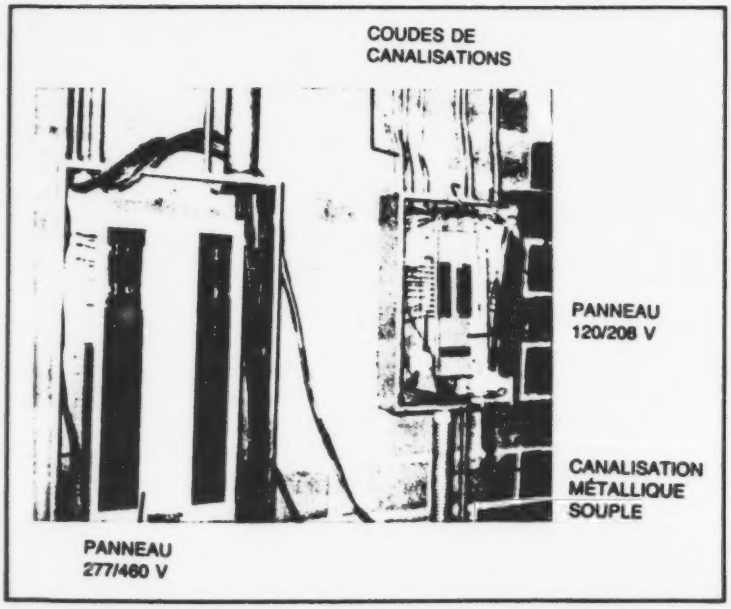


Fig. 5. Dans ces deux panneaux de distribution triphasés, les fils sont en cours d'installation. Le panneau 277/460 V (volts) est destiné aux moteurs; le panneau 120/208 V est destiné à l'éclairage et aux prises de courant.

8 Lignes d'alimentation

Nous allons poursuivre notre promenade. Nous laissons les dérivations pour passer aux lignes d'alimentation. En général, les *lignes d'alimentation* reçoivent l'électricité de l'amenée de courant et la distribuent aux dérivations.

Des lignes d'alimentation distinctes doivent être prévues pour la force motrice et la lumière. Ainsi, si l'un des circuits fait défaut, l'autre n'est pas touché. Par exemple, si les fusibles d'une ligne de force motrice sautent et provoquent l'arrêt des moteurs, il ne faut pas que l'éclairage de l'usine tombe lui aussi en panne. Par ailleurs, s'il existe des circuits distincts pour alimenter les équipements et l'éclairage, les chutes de tension provoquées par le démarrage des moteurs à grande puissance ne risquent pas de faire osciller ou baisser l'éclairage.

Il arrive cependant que les mêmes lignes alimentent, dans une partie de l'usine, les équipements et l'éclairage. De toute façon, les lignes d'alimentation sont généralement conçues pour une puissance utile si élevée que le déclenchement des disjoncteurs qui les protègent se produit rarement. Du fait que le système a une faible résistance, la puissance brusquement appelée par les différentes charges ne provoque aucune chute de tension suffisamment importante pour influer sur la source d'éclairage.

9 Transformateurs

Selon les besoins en puissance des équipements, les lignes d'alimentation peuvent devoir fournir des tensions différentes dans diverses parties de l'usine. Le cas échéant, **on installe des transformateurs pour adapter la tension de la ligne d'amenée de courant aux tensions requises par les dérivations.** Trois types de transformateurs sont utilisés dans les usines les *transformateurs secs, isolés à l'askarel* et *isolés à l'huile*.

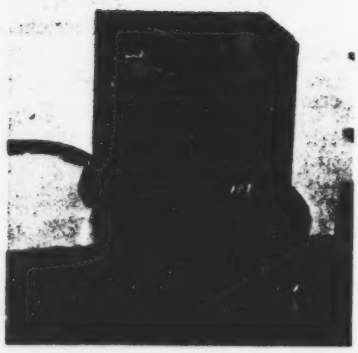


Fig. 6 Ce transformateur sec triphasé a une puissance nominale de 45 kVA (kilovoltampères) et peut réduire une tension de 480 V à 120/208 V.

Dans les transformateurs secs comme celui représenté sur la **figure 6**, aucun liquide n'est employé pour le refroidissement et l'isolation des enroulements. Ces transformateurs sont couramment utilisés à l'intérieur des locaux parce qu'ils peuvent être installés sans cabine à l'épreuve du feu, dans toutes les parties de l'usine, à l'exception de certaines zones dangereuses. Ils s'adaptent bien aux installations électriques dans lesquelles les lignes d'alimentation à haute tension desservent des transformateurs installés à l'intérieur de l'usine.

Les transformateurs isolés à l'askarel renferment dans leur cuve des liquides spéciaux ininflammables. Ces liquides assurent l'isolement des enroulements et le refroidissement du transformateur. Les

transformateurs isolés à l'huile sont remplis d'huile pour les mêmes raisons. Ils sont rarement installés à l'intérieur d'un bâtiment. Le cas échéant, ils sont logés dans des chambres de transformateur.

Les transformateurs installés à l'intérieur doivent être montés sur des surfaces non combustibles telles que colonnes d'acier, poutres, ou murs et planchers de maçonnerie. Dans un grand nombre d'usines, les transformateurs sont couramment utilisés pour réduire la tension d'alimentation à la tension requise pour les circuits d'éclairage. Par exemple, la tension d'alimentation peut être réduite de 480 V (volts) à 120/208 V ou 120/240 V. Ces transformateurs sont souvent installés près des panneaux d'éclairage placés sur des colonnes ou des murs de maçonnerie. Les transformateurs secs comme celui représenté à la figure 6, sont ceux que l'on préfère parce qu'ils s'installent facilement et nécessitent peu d'entretien.

10 Transformateurs extérieurs

On voit souvent un transformateur ou une batterie de transformateurs installés à l'extérieur, sur le terrain d'une usine. En règle générale, le transformateur est monté sur un socle en béton et est entouré d'une clôture. Certains transformateurs de conception plus récente, comme le transformateur monté sur socle représenté à la **figure 7**, sont complètement fermés pour des raisons d'esthétique et de sécurité.

Les transformateurs extérieurs sont généralement isolés à l'huile. Lorsque des transformateurs à l'huile plus petits sont installés contre le mur extérieur d'un bâtiment, il faut éviter de les placer trop près des portes, des fenêtres ou des sorties de secours.

Que les transformateurs soient installés à l'intérieur ou à l'extérieur de l'usine, il faut des lignes d'alimentation pour les raccorder à la source d'alimentation et aux dérivations qu'ils alimentent. Les lignes d'alimentation (ou les conducteurs) doivent être posées dans des canalisations, car elles se ramifient dans toute l'usine comme les branches d'un arbre.

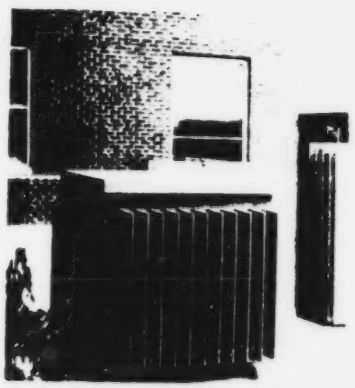


Fig. 7. Les transformateurs extérieurs doivent être suffisamment éloignés des parties combustibles du bâtiment pour éviter, en cas d'incendie du transformateur, que le feu se propage à l'ensemble du bâtiment. On recommande en général une distance de 2 m (mètres), soit 6 pi (pieds), entre le transformateur et le bâtiment.

Exercice de contrôle 2

Vous allez maintenant faire une deuxième pause qui vous permettra de revoir quelques points-clés. Si vos réponses sont différentes des nôtres, vous trouverez l'explication en vous rapportant à la section citée en référence après chaque réponse.

Vos réponses

1. Tout équipement utilisant ou consommant de l'électricité est appelé appareillage _____ . — 1. _____

2. En général, l'énergie électrique peut se transformer en trois autres formes, ce sont: _____ , _____ et _____ . — 2. _____

3. Les dérivations (universelles, simples) _____ transportent l'électricité vers les prises de courant standard et les prises lumière. — 3. _____

4. Quels sont les trois composants de base du circuit d'un moteur? — 4. _____

5. À l'amenée de courant, les lignes _____ distribuent la puissance vers les dérivations. — 5. _____

6. Quels sont les trois types de transformateurs que l'on trouve dans les usines? — 6. _____

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 2

1. d'utilisation — Section 5
2. la chaleur — Section 2
3. universelles — Section 6
4. Sectionneur — Contrôleur — Moteur
5. d'alimentation — Section 8
6. isolé à sec — isolé à l'askarel — isolé à l'huile — Section 9

Section 7

11 Canalisations et conducteurs

Toutes les lignes d'alimentation et les dérivations dont nous avons parlé nécessitent des conducteurs qui doivent être posés dans des canalisations. Les conducteurs sont dans des câbles ou des barres omnibus. Les câbles sont semblables à ceux que l'on utilise dans les installations résidentielles; ils sont toutefois généralement de plus gros calibre et leur isolant et leur blindage peuvent différer.

Une barre omnibus n'est rien d'autre qu'une barre métallique rigide. Elle est généralement de section rectangulaire.

Pour l'instant, nous allons passer en revue quelques-unes des canalisations les plus couramment utilisées dans une usine.

12 Chemins de câbles et caniveaux auxiliaires

Les chemins de câbles et les caniveaux auxiliaires peuvent être en tôle, fabriqués à peu près de la même façon. Leur utilisation, par contre, n'est pas la même. Les *chemins de câbles* sont munis de plaques montées sur charnières ou amovibles qui permettent de loger et de protéger les fils. Ceux-ci sont posés une fois que les chemins de câbles sont entièrement installés. Ils sont utilisés dans les usines pour les ouvrages à découvert où ils offrent l'avantage d'un système de câblage souple.

Les *caniveaux auxiliaires* sont utilisés lorsqu'il faut prévoir un espace de câblage supplémentaire dans les salles de compteurs, les panneaux de commande et autres points similaires dans les systèmes de câblage internes. Les caniveaux auxiliaires sont conçus pour loger des barres omnibus ou des fils de n'importe quel calibre. Les interrupteurs, les fusibles et autres organes de commande ne peuvent être installés dans des caniveaux auxiliaires.

13 Gaines de distribution et canalisations de câbles

Une *gaine de distribution*, c'est-à-dire l'ensemble des canalisations de câbles, est un *chemin de câbles* qui contient des barres omnibus en cuivre ou en aluminium. Les barres sont isolées les unes des autres et du chemin de câbles. Les gaines de distribution sont fournies

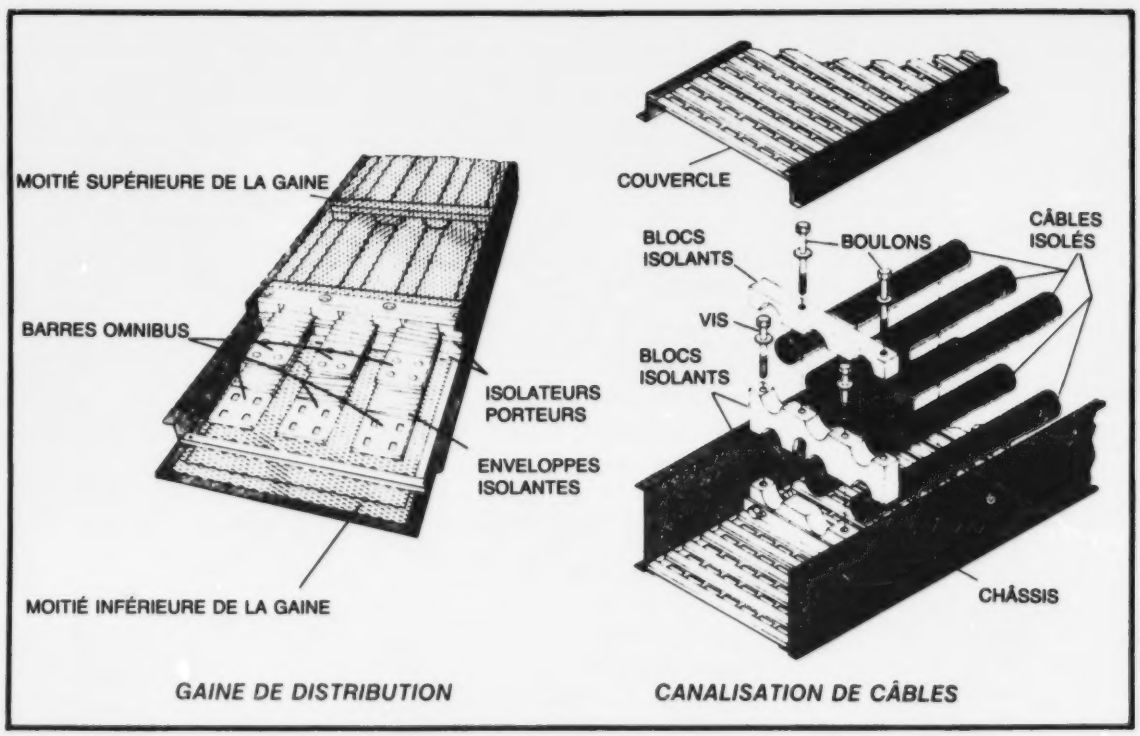


Fig. 8. Cette figure ne représente que deux types de canalisations utilisées dans une usine. Alors qu'une gaine de distribution est livrée entièrement montée, une canalisation de câbles est généralement montée au moment de l'installation.

entièrement montées, comme celle représentée à la **figure 8**, et boulonnées ensemble. Les sections sont généralement longues de 3 m (10 pi). Pour les bornes des armoires et des panneaux de commande, ou lorsque des changements de direction sont nécessaires, des sections spéciales sont fabriquées à la longueur désirée. Les gaines de distribution sont très commodes lorsqu'il faut changer les circuits, ce qui est très fréquent dans l'exploitation d'une usine industrielle. Des ouvertures sont prévues le long du chemin de câbles pour le branchement des dispositifs de commande des dérivations. Ces dispositifs peuvent être de type à fusible, à interrupteur à fusible ou à disjoncteur.

La gaine de distribution et les organes de commande peuvent être facilement déplacés pour alimenter des équipements de fabrication sur les lignes de montage, par exemple, ce qui permet une souplesse dans l'alimentation électrique. Les gaines de distribution peuvent également être conçues de manière à permettre l'accès aux barres omnibus en tout point; des baladeurs viennent au contact des barres omnibus et alimentent des équipements mobiles tels que grues, monte-charge et outils portatifs.

Une *canalisation de câbles* est un ensemble de fils ou de câbles isolés, comme le montre la figure 8. Les fils isolés sont maintenus

par des blocs isolants spéciaux boulonnés au châssis. Un couvercle amovible sert à protéger les fils. Le couvercle et le fond du châssis sont munis de trous d'aération.

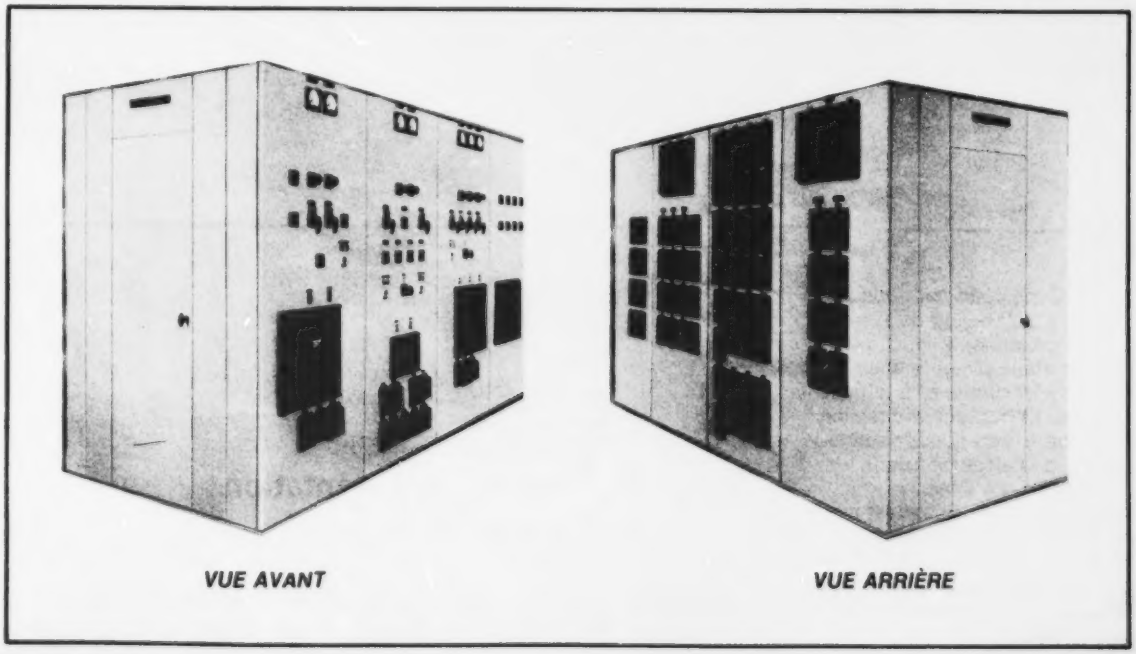
14 Panneaux de commande

Nous venons de passer en revue les principaux types d'équipements électriques qui constituent l'installation électrique de l'usine, de la charge à l'amenée de courant. À l'amenée de courant, se trouvent des panneaux qui renferment les dispositifs de commande et de protection des lignes d'alimentation.

Sur une ligne d'amenée de courant résidentielle, on trouve généralement un panneau principal comme le montre la figure 3. Cependant, une usine est normalement équipée d'un panneau beaucoup plus grand ou d'un panneau de commande comme le montre la **figure 9.** Un panneau de ce type commande et protège les lignes d'alimentation qui se ramifient dans toutes les parties de l'usine. En règle générale, le panneau de commande est alimenté par le transformateur principal de l'usine.

Si le transformateur appartient à l'usine, cette partie du système représente le point de départ de l'installation électrique de l'usine et le point final du réseau de la compagnie d'électricité. Avant d'aborder ce dernier, nous allons essayer de comprendre comment tous les composants dont nous avons parlé sont assemblés pour former l'installation électrique de l'usine.

Fig. 9. Dans ce panneau de commande, les appareils de mesure et les interrupteurs de commande et d'essai sont placés au panneau avant d'où ils peuvent être facilement actionnés, observés et contrôlés. Le panneau arrière contient les relais de protection, les wattheuremètres, les enregistreurs et les régulateurs de tension.



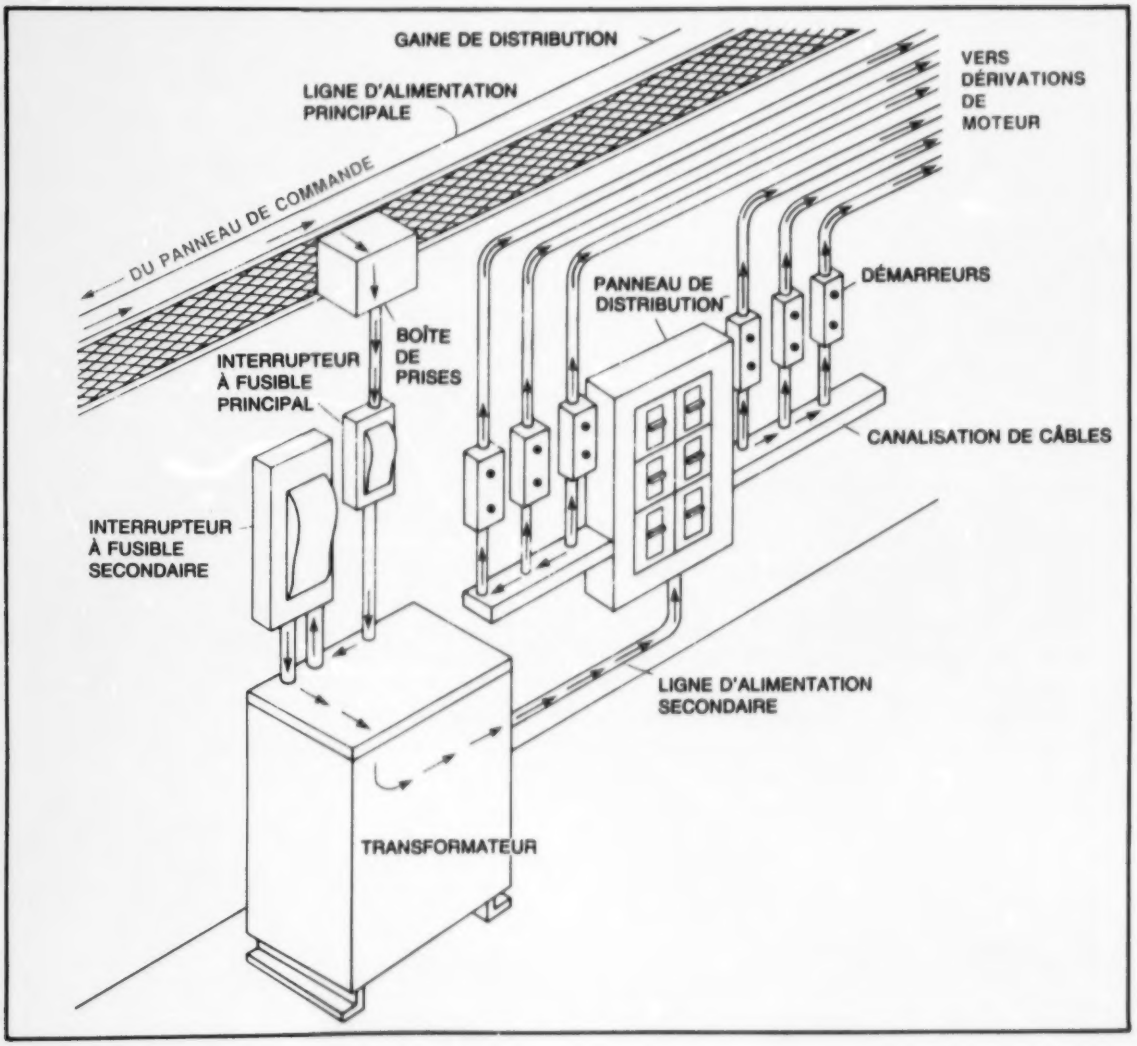


Fig. 10. Dans cette partie du réseau de distribution de l'usine, en règle générale, le transformateur alimente aussi un panneau d'éclairage et une boîte de prises. En suivant la direction des flèches, vous pouvez suivre le passage de l'électricité dans les équipements. La ligne d'alimentation principale est aussi appelée ligne d'alimentation primaire ou ligne à haute tension. La ligne d'alimentation secondaire est également appelée ligne à basse tension.

15 Des lignes d'alimentation aux dérivations

La **figure 10** montre la plupart des équipements dont nous avons parlé. En bref, nous pouvons dire que la puissance électrique est fournie

par le panneau de commande principal à partir de l'amenée de courant de l'usine, et qu'elle alimente (met sous tension) la ligne principale. Le courant primaire qui alimente le transformateur provient de la ligne d'alimentation principale et est contrôlé par un interrupteur à fusible. La puissance fournie par le transformateur, ou puissance secondaire, est également contrôlée par un interrupteur à fusible avant de se diriger vers le panneau de distribution au moyen de la ligne d'alimentation secondaire. Au panneau de distribution, la puissance est répartie sur six dérivations de moteur. Ces dernières partent du panneau de distribution puisqu'il comprend leurs dispositifs de protection. Les dérivations se dirigent vers les organes de commande en passant dans un caniveau secondaire, puis vers les moteurs.

Souvenez-vous que la figure 10 montre les équipements requis pour six dérivations seulement. Dans une grande usine, on peut trouver plusieurs centres de distribution comme le montre la figure 10. L'installation électrique d'une grande usine peut être conçue de différentes manières. Chaque modèle présente des avantages et des inconvénients.

16 Réseaux de distribution pour installations industrielles

Deux types de réseaux de distribution sont utilisés dans les usines: le réseau en étoile simple classique et le réseau en étoile primaire. Dans le premier réseau, la haute tension fournie par la compagnie d'électricité est abaissée ou réduite à la tension d'utilisation. Cette opération s'effectue au poste situé à proximité de l'usine. Des lignes à basse tension transportent la puissance électrique vers les charges.

Lorsqu'un réseau en étoile primaire est utilisé, les câbles à haute tension ou lignes principales vont jusqu'aux postes de distribution placés à l'intérieur de l'usine. Ces postes renferment les équipements de protection et les transformateurs et sont placés à proximité des centres de distribution. La figure 10 représente une partie d'un réseau de distribution primaire.

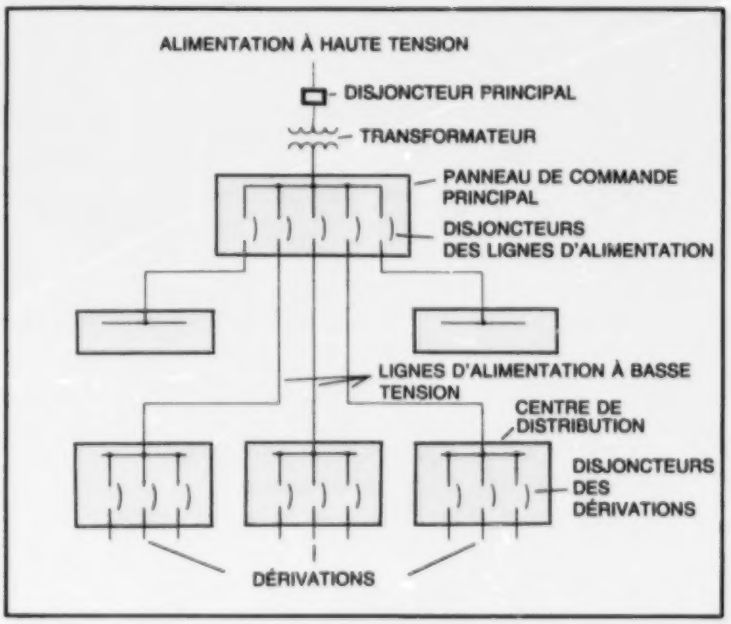


Fig. 11. Ce réseau en étoile simple est le moins fiable des réseaux de distribution, car une panne du transformateur entraîne l'arrêt de tout le réseau.

17 Réseau de distribution en étoile simple classique

La **figure 11** représente le diagramme schématique d'un réseau en étoile simple classique. Le disjoncteur principal assure la liaison entre le primaire du transformateur et l'alimentation à haute tension. Le transformateur abaisse la haute tension à la tension d'utilisation. À partir de l'enroulement secondaire du transformateur, le courant circule dans le panneau de commande principal vers les lignes d'alimentation à basse tension qui se terminent aux panneaux de distribution. Les dérivations commencent à ces panneaux et distribuent la puissance aux charges. On trouve des disjoncteurs dans le panneau de commande principal et les panneaux de distribution.

On pourrait prolonger les lignes à basse tension du tableau de commande principal du diagramme schématique de la figure 11 selon un réseau en étoile ressemblant aux cinq doigts écartés de la main, d'où le nom de réseau en étoile.

Le réseau en étoile simple alimente l'ensemble des charges électriques à partir d'un seul transformateur, ce qui lui permet de tirer profit des différentes charges. La charge totale à tout moment donné est inférieure à la somme des charges individuelles et ce, pour deux raisons: certaines charges sont hors tension et certaines autres ne fonctionnent pas à pleine charge.

18 Réseau de distribution en étoile primaire

Le réseau en étoile primaire est aussi connu sous le nom de réseau en étoile simple ou centre de distribution. La **figure 12** représente le diagramme schématique d'un réseau de ce type. Deux lignes d'alimentation primaires et des disjoncteurs protègent les lignes à haute tension. Des interrupteurs d'isolement de ligne permettent de contrôler individuellement chaque transformateur abaisseur. Les panneaux de distribution sont équipés de disjoncteurs pour éviter toute surcharge des transformateurs. D'autres disjoncteurs sont prévus pour la protection des dérivations qui alimentent les moteurs et les autres charges.

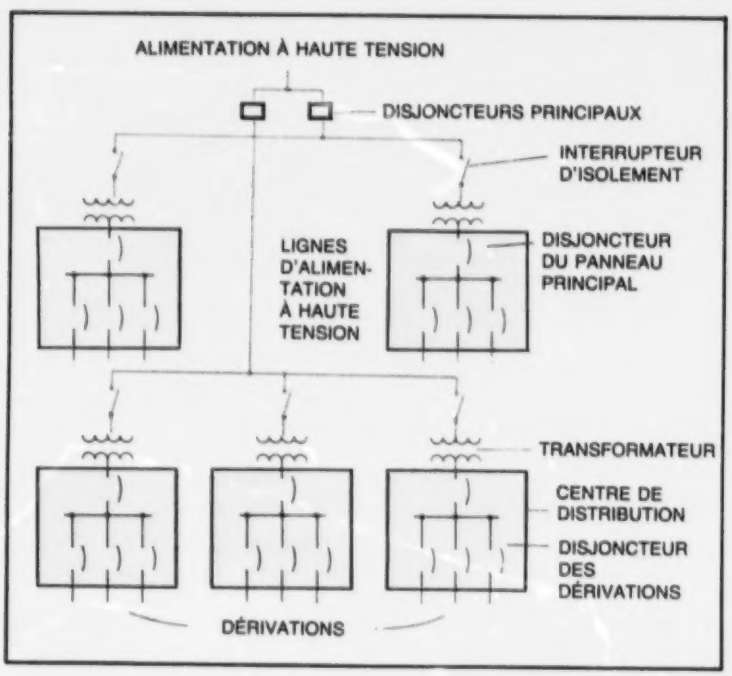


Fig. 12. Dans ce réseau de distribution en étoile primaire, tous les transformateurs et leurs circuits dérivés peuvent être isolés du reste du système.

Le réseau en étoile primaire représenté à la figure 12 est équipé d'un plus grand nombre de transformateurs, mais de plus petites dimensions que le réseau simple classique représenté à la figure 11. Les transformateurs se trouvent dans les postes de distribution avec les interrupteurs à haute et à basse tension. Ce système est plus fiable que le réseau en étoile simple classique parce qu'il ne comprend pas de longues lignes d'alimentation à basse tension. De plus, une panne de transformateur n'entraîne pas la mise hors service de toute l'installation électrique de l'usine.

19 Réseau en étoile primaire bouclé

Le réseau en étoile primaire bouclé représenté à la **figure 13** est alimenté par la source à haute tension au moyen du disjoncteur principal de la ligne d'alimentation primaire. Une section des lignes d'alimentation à haute tension et de l'enroulement primaire du transformateur abaisseur est raccordée en permanence à chaque interrupteur primaire. Les centres de distribution sont équipés de disjoncteurs qui protègent les enroulements secondaires des transformateurs abaisseurs et les dérivations.

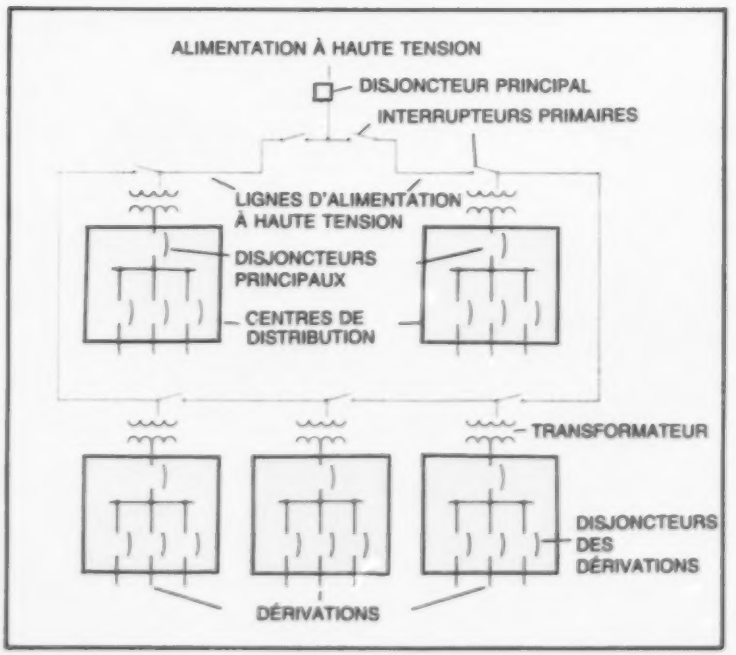


Fig. 13. Grâce à ce réseau primaire bouclé, même une coupure ou un défaut dans les lignes d'alimentation à haute tension ne présente pas de risque, si l'on actionne correctement les interrupteurs primaires. Vous remarquerez que les équipements de la figure 10 peuvent également être utilisés avec ce type de réseau ou un réseau en étoile primaire.

Lorsque tous les interrupteurs primaires sont fermés, les sections des lignes d'alimentation à haute tension forment un circuit complet ou boucle. Un réseau bouclé remplit un plus grand nombre de fonctions que les autres réseaux. En cas de panne d'un transformateur ou dans une section de la ligne d'alimentation à haute tension, n'importe quelle section peut être isolée sans que le fonctionnement du reste du réseau ne soit interrompu. Dans le réseau représenté à la figure 12, une panne dans une ligne d'alimentation à haute tension entraînerait la mise hors service d'au moins deux transformateurs et des dérivations qu'ils alimentent. Tous les réseaux équipés de lignes d'alimentation à haute tension présentent les désavantages associés à l'installation et à l'entretien des câbles et des équipements à haute tension.

Exercice de contrôle 3

Il est temps de faire une deuxième pause pour contrôler vos connaissances. Comparez vos réponses aux nôtres et révisez, au besoin, les sections citées en référence.

Vos réponses

1. Vrai ou faux? Les deux types de conducteurs sont les câbles et les barres omnibus.

   1. Vrai Faux
   (Encerclez la bonne réponse)

2. Si vous deviez ajouter de l'espace de câblage dans un panneau de commande, vous utiliseriez un type de canalisation appelée _____ .

   2. _____ _____
   _____

3. Une (canalisation de câbles, gaine de distribution) _____ est un ensemble de fils isolés.

   3. _____

4. Les dérivations de moteur représentées sur la figure 10 commencent au _____ .

   4. _____

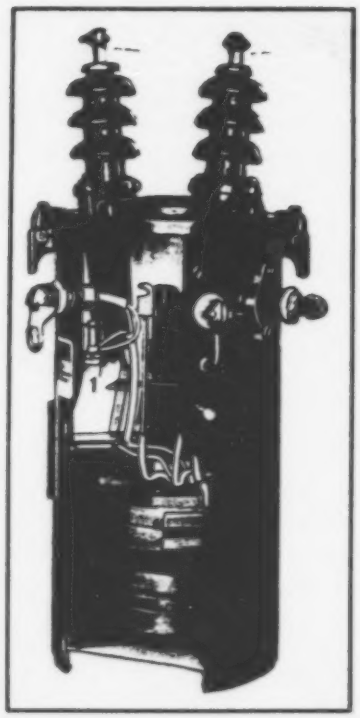
Dans l'espace réservé en face de chaque mot ou groupe de mots de la colonne de droite, inscrivez la lettre correspondant au mot ou groupe de mots qui l'explique le mieux.

5. *a.* Type de réseau de distribution qui remplit le plus de fonctions.
   b. Type de réseau de distribution équipé de lignes d'alimentation à basse tension.
   c. Type de réseau de distribution dans lequel une seule section de lignes d'alimentation à haute tension peut être raccordée à un transformateur.

   5. ___ Réseau en étoile simple
   ___ Réseau en étoile primaire
   ___ Réseau en étoile primaire bouclé

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 3

1. Vrai — Section 11
2. canivaau — auxiliaire — Section 12
3. canalisation de câbles — Section 13
4. panneau de distribution — Section 15
5. *b* Réseau en étoile simple — Section 17
   c Réseau en étoile primaire — Section 18, figure 12
   a Réseau en étoile primaire bouclé — Section 19



Courtoisie de Allis-Chalmers

Fig. 14. Un grand nombre de transformateurs de distribution comme celui-ci sont équipés de thermostats qui détectent toute élévation de température interne anormale. Ils peuvent être également munis de voyants lumineux qui s'allument en cas de dépassement de température.

Le réseau électrique d'une compagnie d'électricité

20 Transformateurs de distribution (sur poteau)

Vous connaissez maintenant quelques-uns des réseaux électriques d'une usine. Nous avons remonté le trajet de l'électricité jusqu'à l'amenée de courant, mais vous vous demandez sans doute comment l'électricité est transportée jusque là. Pour le découvrir, nous allons explorer la deuxième partie du réseau électrique, celle qui est exploitée par la compagnie d'électricité. Nous allons voir un réseau classique qui nous conduira de la ligne d'amenée de courant à la centrale. Nous espérons que cette «promenade» vous intéressera.

Lorsque vous regardez à l'extérieur et que vous apercevez les *poteaux* du réseau, vous voyez des transformateurs placés tout en haut sur un grand nombre d'entre eux (figure 14). En règle générale, ces transformateurs de distribution alimentent votre maison en abaissant la tension primaire du réseau de 4 160 V c.a. (courant alternatif) à la tension secondaire trois fils 120/240 V c.a., comme l'indique la **figure 15**. Les transformateurs de ce type alimentent également l'éclairage des rues, comme les lampadaires à vapeur de mercure qui éclairent nos routes nationales. Des cellules photoélectriques assurent la commande automatique de cet éclairage public. Cette même basse tension fournie par les transformateurs alimente les boutiques, les grands magasins, les usines, les écoles et les églises dans les régions urbanisées.

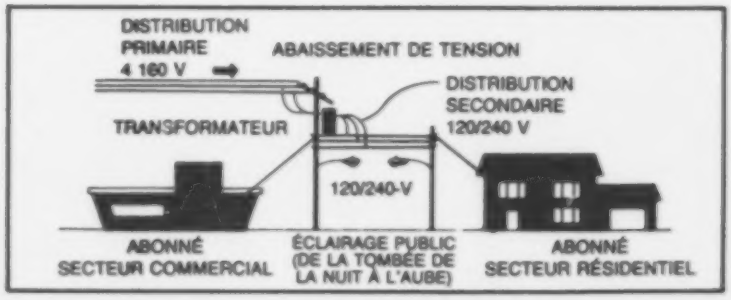


Fig. 15. Le service assuré aux nombreux abonnés du secteur commercial et des petites entreprises est semblable à celui assuré à la plupart des abonnés du secteur résidentiel.

Le réseau qui vient d'être décrit est un réseau de câbles aériens. Dans le cas d'un réseau de distribution résidentiel souterrain, les conducteurs sont enterrés. Les transformateurs peuvent cependant être montés sur le dernier poteau du réseau aérien ou sur des socles dans des cours ou autres lieux appropriés. À part cela, la tension est fournie de la même manière. Pour la compagnie d'électricité, les transformateurs constituent la première partie du réseau. Chacun d'entre nous peut les voir, comme les fils électriques qui alimentent notre maison. Le reste du réseau de distribution de la compagnie d'électricité n'est pas connu de la majorité du grand public.

21 La sous-station

Une sous-station d'alimentation comme celle représentée à la **figure 16,** n'est en fait qu'une grande station de transformation. Bien qu'en règle générale, personne ne travaille dans une sous-station, des vérifications d'entretien préventif y sont néanmoins effectuées.

La moyenne tension de ce réseau est de 23 000 V. Le transformateur abaisse cette tension à une tension de distribution primaire de 4160 V. Cette tension est ensuite acheminée par les câbles aériens ou, dans certains cas, par un système de distribution souterrain.

La plupart des grandes installations, comme les écoles et les petites industries, sont directement alimentées en 4160 V, comme le montre la **figure 17**. Les abonnés sont alimentés par leur propre poste de transformation qui abaisse la tension en fonction de leurs besoins en électricité.

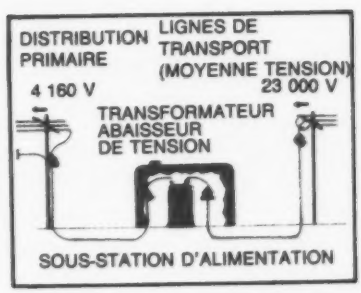


Fig. 16. Après avoir parcouru une certaine distance, les lignes à moyenne tension alimentent des sous-stations où la tension est abaissée à une valeur convenant aux circuits primaires.

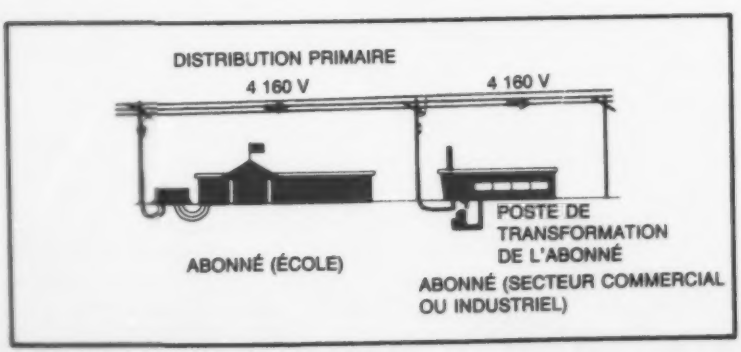


Fig. 17. Les tensions des circuits primaires alimentent directement un grand nombre d'abonnés, comme l'école représentée dans ce schéma.

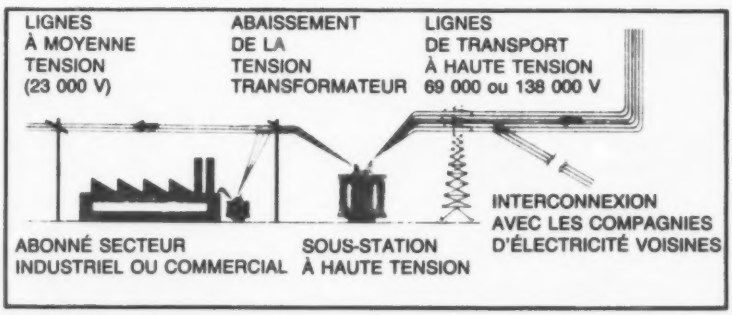


Fig. 18. La haute tension de transport est transformée en moyenne tension dans les sous-stations à haute tension. Un grand nombre d'industries de moyenne importance sont alimentées directement par des lignes à moyenne tension. La plupart des interconnexions avec les compagnies d'électricité sont à haute tension.

À la **figure 18**, on trouve une sous-station à haute tension. Il s'agit également d'une grande station de transformation. Elle abaisse la tension des lignes de transport à 23 000 V. Les deux hautes tensions des lignes de transport couramment utilisées par les compagnies d'électricité sont de 69 000 V et 138 000 V. La haute tension est nécessaire au transport de la puissance électrique sur de longues distances avec des pertes minimes.

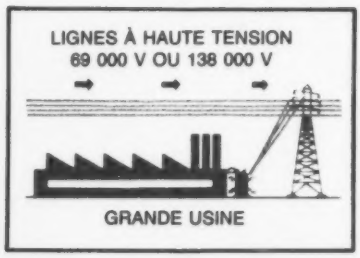


Fig. 19. Certaines grandes usines nécessitent tellement de puissance qu'elles sont équipées de leurs propres sous-stations à haute tension alimentées par la haute tension des lignes de transport.

Le réseau de transport constitué par des lignes à haute tension traverse la campagne sur des pylônes en acier ou des poteaux en bois. Lorsqu'on s'approche en voiture des pylônes ou des poteaux, on constate généralement, lorsque la radio est allumée, que la réception des programmes est brouillée par l'électricité statique provenant des lignes à haute tension. Ces lignes sont reliées au réseau des compagnies d'électricité voisines afin de pouvoir répartir l'énergie disponible en cas d'urgence.

Les grandes usines, comme celle représentée à la **figure 19**, reçoivent directement leur courant des lignes à haute tension. Elles sont équipées de réseaux électriques qui leur permettent d'obtenir la tension et le courant nécessaires à leurs opérations.

22 Distribution aérienne et souterraine

Bien que les câbles aériens ne soient pas très esthétiques, ils sont dans la plupart des cas pratiques et économiques. Les câbles de transport aérien à haute tension, avec leurs pylônes de 21 m (70 pi) de haut, pouvant aller jusqu'à 75 m (250 pi) au-dessus des rivières, remplissent très bien leurs fonctions. S'il fallait les remplacer par un réseau souterrain, l'opération serait extrêmement coûteuse. Néanmoins, les réseaux souterrains et aériens ont l'un et l'autre leurs avantages et leurs inconvénients. Cet aspect sera abordé en détail dans d'autres cours.

Il y a des lieux où les réseaux souterrains présentent des avantages. Dans les quartiers commerçants du centre-ville et dans les zones récemment urbanisées, il est plus commode de mettre les câbles dans des canalisations. Dans le réseau représenté à la **figure 20**, le câble sous gaine de plomb est posé dans des canalisations encastrés dans

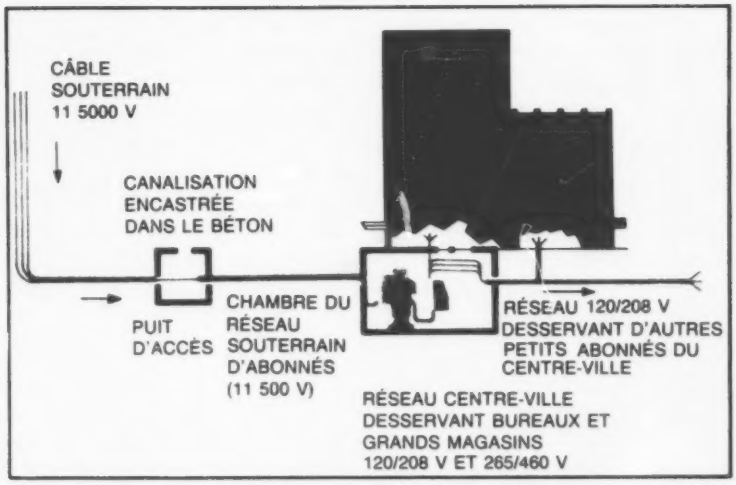


Fig. 20. Un réseau entièrement souterrain a des avantages esthétiques du point de vue de l'environnement. De plus, les risques d'endommagement des lignes par suite d'intempéries sont éliminés.

du béton. Les canalisations aboutissent dans des puits d'accès[1]. Le câble peut être tiré d'un puits d'accès à l'autre lorsque des réparations sur les lignes d'abonnés sont nécessaires. Les sous-stations sont protégées par des cabines souterraines et les abonnés sont directement alimentés par les réseaux à basse tension souterrains. Un réseau de câbles souterrain fournit normalement une tension de 11 500 V à partir du réseau. La sous-station souterraine abaisse cette tension à 120/240 V ou à une autre tension d'utilisation.

23 Le générateur d'électricité

La **figure 21** représente un générateur électrique qui produit une tension de 11 500 V. Cette tension est ensuite acheminée soit au transformateur élévateur, soit au réseau de câbles souterrain.

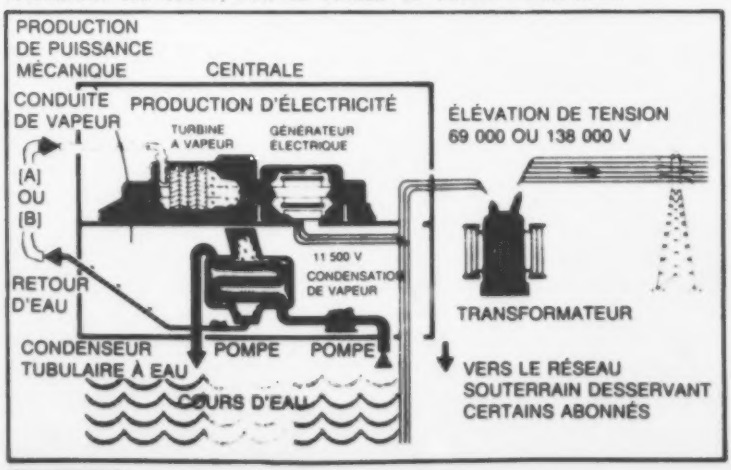


Fig. 21. Les lettres [A] ou [B] à gauche de l'illustration, représentent les sources énergétiques. La lettre [A] correspond à une turbine à vapeur et la lettre [B], à un générateur de vapeur nucléaire, qui sont l'un et l'autre représentés sur les figures 22 et 23.

Comment le générateur d'une centrale électrique produit-il du courant? Il fonctionne comme n'importe quel petit générateur.

Tout d'abord, un grand électro-aimant est fixé à l'arbre d'une turbine à vapeur. Lorsque la vapeur circule dans la turbine, l'arbre tourne. Nous sommes donc en présence d'un électro-aimant tournant à grande vitesse.

L'aimant en rotation est logé dans une bobine constituée de conducteurs en cuivre. Lorsque l'aimant tourne, le champ magnétique provoque un mouvement d'électrons dans la bobine. Si l'aimant tourne à la vitesse prévue, le courant ainsi produit est un courant alternatif d'une fréquence de 60 Hz (hertz) ou cycles par seconde.

Fig. 22. Les générateurs de vapeur à charbon sont couramment utilisés. Les centrales à charbon sont placées le plus près possible des mines de charbon.

24 Production de la vapeur

L'électricité ne peut être produite si l'aimant ne tourne pas. C'est là que la vapeur entre en scène. La turbine à vapeur représentée à la **figure 21** est conçue pour utiliser presque toute l'énergie fournie par la vapeur et faire tourner l'axe. Celui-ci porte l'électro-aimant (générateur) et le fait tourner.

L'énergie utilisée pour produire la vapeur est d'origine thermique et est obtenue par la combustion de charbon, de gaz naturel, de combustible ou par fission nucléaire (séparation atomique).

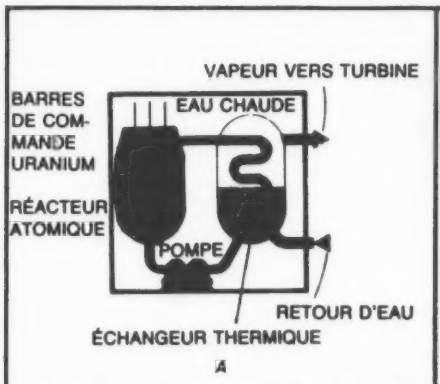
Chaque source d'énergie nécessite un traitement spécial. Quelle que soit la source, son rôle est de créer la chaleur qui permettra de porter l'eau à ébullition pour produire de la vapeur. La **figure 22** représente un générateur de vapeur fonctionnant au charbon et la **figure 23**, un générateur de vapeur utilisant l'énergie nucléaire.

Le charbon brûlé dans les générateurs de vapeur est concassé et pulvérisé en poudre fine. Le charbon ainsi pulvérisé est ensuite soufflé à haute pression dans de grandes chaudières. Les flammes et les gaz chauds dégagés par la combustion du charbon passent dans un réseau constitué de milliers de tubes d'acier remplis d'eau. L'eau dans les tubes est portée à ébullition et la vapeur ainsi produite sert à faire tourner la turbine à vapeur.

Dans une centrale nucléaire, on fait monter et descendre des barres de graphite pour déclencher et contrôler une réaction en chaîne de fission nucléaire. La division des atomes d'uranium dans le réac-

teur nucléaire entraîne un dégagement de chaleur. Cette chaleur est transférée à de l'eau circulant à haute pression. Au cours du deuxième échange de chaleur, l'eau recyclée porte à ébullition une autre eau qui produit elle-même de la vapeur. Une ébullition directe n'est pas réalisable, car la vapeur ainsi produite deviendrait radioactive.

Courtoisie d'Hydro-Québec



GÉNÉRATEUR DE VAPEUR NUCLEAIRE

REMPLACE LA CHAUDIÈRE À CHARBON LORSQU'ON UTILISE L'ATOME COMME COMBUSTIBLE

CENTRALE NUCLÉAIRE

25 Sources d'énergie

L'électricité fait partie de la nature, mais pour l'instant nous ne savons pas encore comment exploiter les éclairs. Le seul moyen dont nous disposons pour créer de l'électricité pour nos besoins courants est de faire tourner un aimant dans une bobine de conducteurs.

Porter de l'eau à ébullition pour produire de la vapeur sous pression représente une tâche continue. La vapeur est obtenue en brûlant un combustible ou par fission atomique. Elle pourra peut-être, dans l'avenir, être produite par l'énergie solaire et par fusion atomique. (La fusion atomique est une réaction contrôlée comme celle d'une bombe à hydrogène, tandis que la fission atomique est une réaction contrôlée comme celle d'une bombe atomique.) Un jour, peut-être, dans votre métier d'électricien, vous utiliserez de l'électricité produite selon l'un ou l'autre de ces procédés.

Chaque étape, du générateur électrique à l'abonné, nécessite l'intervention de différentes catégories d'électriciens, et l'utilisation de différentes tensions, de différents équipements et de différents outils.

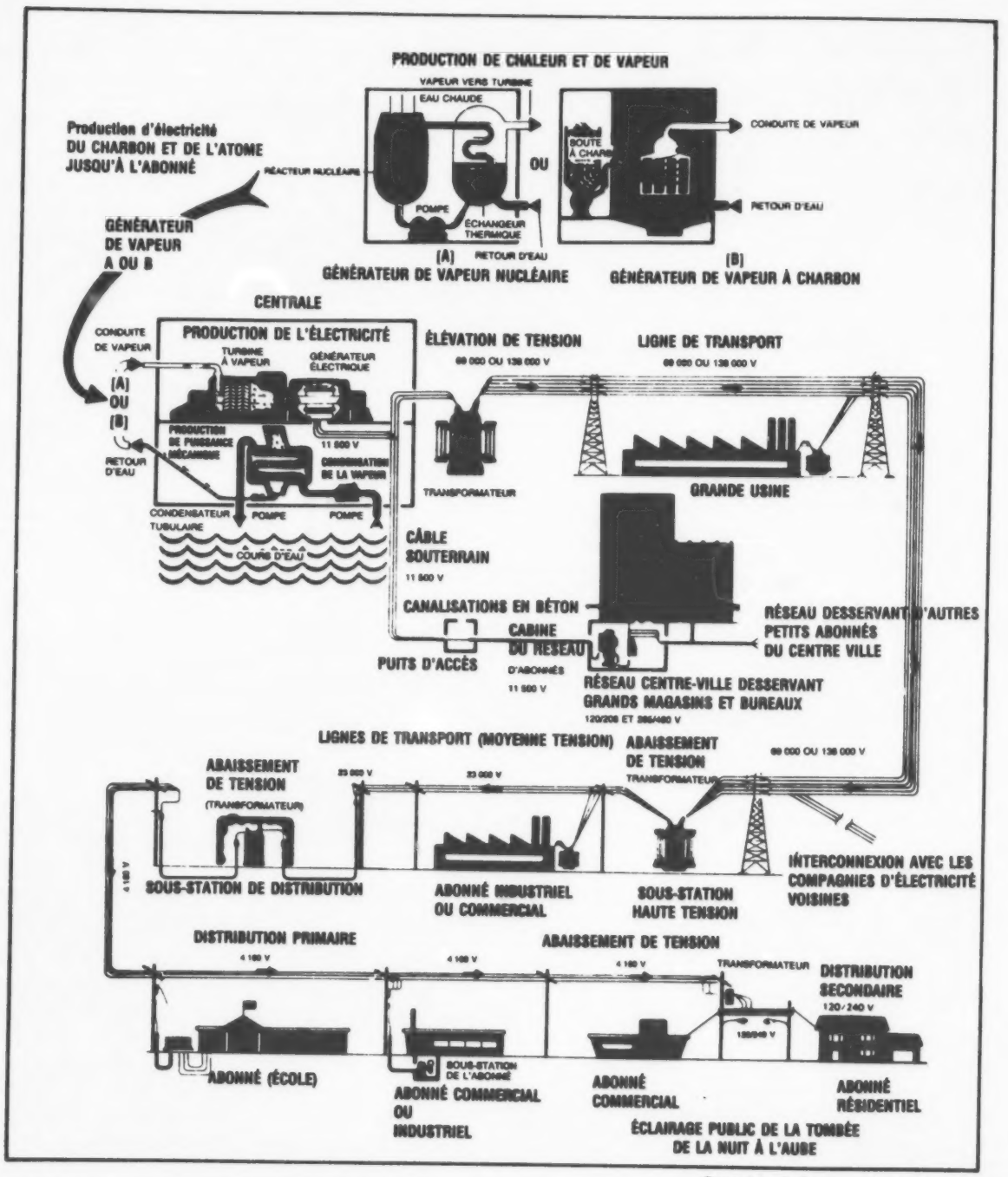


Fig. 24. Le parcours complet de l'électricité, de sa production à l'installation de l'abonné, comprend un vaste réseau de lignes et d'équipements qui peut s'étendre sur plusieurs centaines de kilomètres.

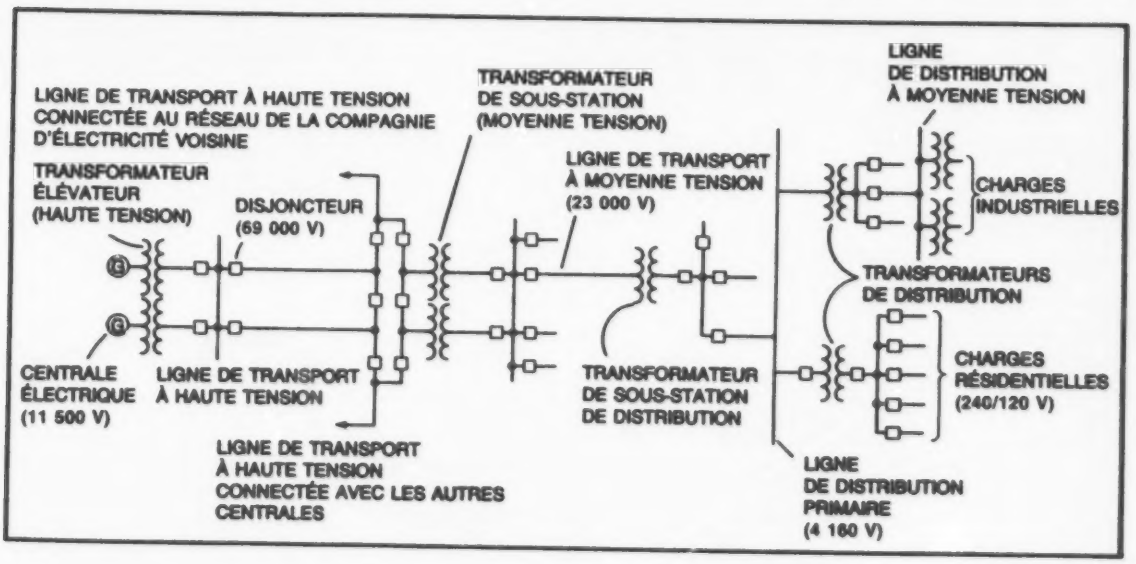
Courtoisie de Duquesne Light Company

Nous allons maintenant examiner la **figure 24** qui résume l'ensemble de notre voyage au pays de l'électricité, de la matière première à l'abonné.

26 Le réseau en bref

Nous allons examiner de près la configuration simple d'un réseau électrique classique pour mieux comprendre le réseau dans son ensemble. La **figure 25** représente le schéma de montage *unifilaire* d'un réseau électrique. Il montre le raccordement des composants essentiels d'un réseau classique. Puisque les trois phases sont identiques, le schéma de montage unifilaire n'indique que l'une des trois phases d'un réseau électrique.

Fig. 25. Maintenant que vous connaissez chaque composant d'un réseau électrique, vous n'aurez aucune difficulté à comprendre le schéma de montage unifilaire de ce réseau complet. Remarquez que les sous-stations sont généralement identifiées par leur tension de sortie.



La puissance fournie par la centrale, soit environ 11 500 V, est envoyée à un transformateur élévateur. Généralement, le transformateur alimente un appareillage de commutation haute tension en 69 000 ou 138 000 V. Le transformateur et l'appareillage de commutation font généralement partie d'une sous-station située à proximité de la centrale. (Les disjoncteurs sont indiqués par des petits carrés.) La puissance est fournie par des lignes de transport à une autre sous-station de transformation (moyenne tension). Dans cette sous-station, la tension est abaissée à 23 000 V par exemple. Cela convient mieux pour la transmission de plus petites quantités d'électri-

cité sur des courtes distances. Les lignes de transport à moyenne tension alimentent les sous-stations de transformation-distribution où la tension est abaissée soit à 4 160 volts, soit à 14 400 volts, soit à 24 900 volts. De la sous-station de distribution, on alimente les transformateurs de distribution qui abaissent et fournissent des tensions aux abonnés commerciaux et résidentiels, de 600 volts, 240 volts ou 120 volts.

Les sous-stations ont plusieurs fonctions et c'est la raison pour laquelle elles portent des noms différents. La fonction et le nom d'une sous-station dépendent de la section du réseau dans laquelle elle se trouve.

Les composants types d'un réseau électrique sont *les réseaux de transport secondaire* et de *distribution*. Il existe des réseaux de distribution résidentiels, industriels ou commerciaux. On trouve également des réseaux de distribution primaires et secondaires.

Encore une fois, cette «promenade» nous a conduit à l'amenée de courant de l'usine. Vous connaissez maintenant le réseau électrique requis pour alimenter l'usine, ainsi que le réseau interne de l'usine qui distribue la puissance électrique vers les différentes charges. Comme vous l'avez sans doute constaté, les systèmes électriques d'un réseau et d'une usine sont très semblables. La seule différence est que leurs composants portent des noms différents et fonctionnent à des niveaux de tension et de courants différents.

Exercice de contrôle 4

Vous allez maintenant faire une pause pendant quelques minutes et revoir quelques points-clés avant de répondre au questionnaire personnel. Comparez vos réponses aux nôtres et révisez, au besoin, les notions qui ne vous sont pas claires.

Vos réponses

1. Une sous-station est, en substance, une installation de _____ . — 1. _____
2. Dans une zone récemment urbanisée, quel est le plus probable: un réseau électrique aérien ou souterrain? — 2. _____
3. L'appareil muni d'un électro-aimant rotatif est appelé _____ . — 3. _____
4. Citez quatre sources d'énergie utilisées pour produire de la vapeur. — 4. _____ _____ _____ _____
5. Un schéma simple montrant les différents raccordements d'un système électrique est appelé schéma _____ . — 5. _____

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 4

1. transformation Section 21
2. souterrain Section 22
3. générateur Section 23
4. Charbon, gaz naturel, combustible et fission nucléaire Section 24
5. de montage unifilaire Section 26

Examen personnel

Lisez attentivement chacune des phrases suivantes et assurez-vous que vous comprenez bien le sens. Chaque phrase est suivie de quatre mots ou groupes de mots, dont un seul est correct. Faites un X sur la lettre correspondant à votre réponse.

1. La pression électrique est appelée:

   A. courant.
   B. tension.
   C. résistance.
   D. inductance.

2. Le point du système de câblage où le courant est prélevé pour alimenter un appareillage d'utilisation est appelé:

   A. panneau de distribution.
   B. tableau de commande.
   C. dispositif.
   D. prise de courant.

3. Le circuit qui renferme les conducteurs reliant le dernier dispositif de protection contre les surintensités terminales et la charge est appelé:

   A. dérivation.
   B. circuit d'alimentation.
   C. circuit de transmission.
   D. circuit de transmission secondaire.

4. Les dispositifs de protection contre les courants de surcharge des moteurs se trouvent généralement dans:

   A. le moteur.
   B. le sectionneur.
   C. l'armoire du contrôleur.
   D. le panneau de distribution de puissance

5. Vous travaillez comme électricien d'entretien dans une grande usine de fabrication. Le type de transformateur que vous trouvez généralement dans l'usine est:

   A. sec.
   B. humide.
   C. isolé à l'askarel.
   D. isolé à l'huile.

6. Les canalisations servent à loger:

   A. les conducteurs du circuit d'alimentation uniquement.
   B. les conducteurs des dérivations uniquement.
   C. ni les conducteurs du circuit d'alimentation, ni ceux des dérivations.
   D. les conducteurs des circuits d'alimentation et les dérivations.

7. Le type de canalisation généralement utilisée pour alimenter des grues et des monte-charge est:

   A. la canalisation de câbles.
   B. la gaine de distribution.
   C. le chemin de câbles.
   D. le caniveau auxiliaire.

8. Sur la figure 10, la puissance secondaire du transformateur est contrôlée par:

   A. une commande à deux touches.
   B. une commande à trois touches.
   C. un disjoncteur.
   D. un rupteur à fusible.

9. Les lanternes d'éclairage public sont automatiquement commandées par des:

   A. contrôleurs.
   B. interrupteurs.
   C. cellules photoélectriques.
   D. transformateurs.

10. À laquelle des sections suivantes du réseau électrique une installation industrielle importante est-elle le plus vraisemblablement raccordée?

    A. Au réseau haute tension.
    B. Au réseau moyenne tension.
    C. Au réseau de distribution primaire.
    D. Au réseau de distribution secondaire.

Les réponses sont données à la page 337.

Distribution de l'énergie électrique

AF0207

(Lexiques)

Français	Anglais
Amenée de courant	Service entrance
Appareil d'éclairage	Fixture
Appareil de mesure	Indicating instrument
Appareillage de connexion	Switchgear
Armature	Shielding
Axe	Spindle
Baladeur	Trolley
Barre de graphite	Graphite rod
Barre omnibus de câbles	Cable bus
Blindage	Shielding
Boîte de prise	Top box
Boîte du sectionneur	Disconnect switch-box
Câble sous plomb	Lead-covered cable
Canalisation	Raceway
Canalisation	Conduit
Canalisation souple	Flexible conduit
Caniveau	Gutter
Caniveau auxiliaire	Auxiliary gutter
Centrale électrique	Generating station
Centrale	Generating plant
Centrale	Power station
Centrale	Power plant
Centrale nucléaire	Atomic power plant
Centre de distribution	Distribution centre
Centre de distribution	Load center
Chemin de câble	Through
Chute de tension	Voltage dip
Circuit d'alimentation	Feeder circuit
Circuit de commande de moteur	Motor control circuit
Collecteur de poussière	Dust collector
Collecteur de vapeur	Steam drum
Combinateur	Controller
Condensateur tubulaire	Water tube condenser
Conduite	Channel (raceway)
Conduite de vapeur	Steam-line
Courant filtré	Smooth current
Courant inverse de blocage	Reverse blocking current
Courant pulsé	Pulsating current
Couvercle	Top cover
Dérivation	Branch circuit
Dérivation de force motrice	Motor branch circuit
Desserte	Service drop
Diode semi-conductrice	Semiconductor diode
Disjoncteur	Circuit-breaker
Disjoncteur bipolaire	Double pole breaker
Disjoncteur boulonné	Bolt-in circuit breaker
Échangeur thermique	Heat exchanger

Anglais	Français
Ampacity	Intensité admissible
Atomic power plant	Centrale nucléaire
Atomic steam generator	Générateur de vapeur nucléaire
Auxiliary gutter	Caniveau auxiliaire
Bolt-in circuit breaker	Disjoncteur boulonné
Boundary line	Ligne de démarcation
Branch circuit	Dérivation
Busway	Gaine de distribution
Cable bus	Barre omnibus de câbles
Channel (raceway)	Conduite
Circuit-breaker	Disjoncteur
Coal pulverizer	Pulvérisateur de charbon
Coal steam generator	Générateur de vapeur à charbon
Conduit	Canalisation
Control switch	Interrupteur de commande
Controller	Combinateur, circuit de commande
Conventionnal simple radial	Système en étoile simple
Current capacity	Capacité de courant
Disconnect switch	Sectionneur
Disconnect switch-box	Boîte du sectionneur
Disconnecting means	Organe de coupure
Distribution centre	Centre de distribution
Double pole breaker	Disjoncteur bipolaire
Dust collector	Collecteur de poussière
Electric generator station	Station génératrice d'électricité
Electrical overload	Surcharge électrique
Feeder circuit	Circuit d'alimentation
Final overcurrent device	Protection contre les surintensités
Fireproof	Ignifuge
Fixture	Appareil d'éclairage
Flexible conduit	Canalisation souple
Fused switch	Rupteur à fusible
Generating plant	Centrale électrique
Generating station	Centrale électrique
Generator station	Station génératrice
Graphite rod	Barre de graphite
Gutter	Caniveau
Heat exchanger	Échangeur thermique
Heavy duty equipment	Équipement pour service intensif
High steel tower	Pylône en acier
High-voltage switch	Interrupteur haute tension
Indicating instrument	Appareil de mesure

Français	Anglais
Élément de redresseur	Rectifying element
Fréquence d'ondulation	Ripple frequency
Gaine de distribution	Busway
Générateur de vapeur à charbon	Coal steam generator
Générateur de vapeur nucléaire	Atomic steam generator
Ignifuge	Fireproof
Intensité admissible	Ampacity
Interrupteur d'essai	Test switch
Interrupteur d'isolement de ligne	Isolating switch
Interrupteur de commande	Control switch
Interrupteur de sécurité	Safety switch
Interrupteur haute tension	High-voltage switch
Ligne de démarcation	Boundary line
Ligne de transmission	Transmission line
Ligne de transmission	Power line
Ligne de transmission secondaire	Substransmission line
Ligne d'alimentation	Power feeder
Ligne interconnectée	Tie line
Organe de coupure	Disconnecting means
Osciller	Flicker (to)
Panneau d'éclairage	Lighting panel
Passe-fils	Wireway
Pointe de courant	Surge (of current)
Polarisation inverse	Reverse bias
Poteau de réseau extérieur	Outdoor utility pole
Prise	Tap
Prise de courant	Outlet
Prise de courant standard	Standard receptacle outlet
Prise lumière	Lighting outlet
Protection contre les surintensités	Final overcurrent device
Puce monocristalline	Single crystal chip
Pulvérisateur de charbon	Coal pulverizer
Pylône en acier	High steel tower
Redressement	Rectification
Redresseur	Rectifier
Redresseur commandé au silicium (SRC)	Silicon controlled rectifier
Redresseur semi-conducteur	Semiconductor rectifier
Rupteur à fusible	Fused switch
Rupteur thermique	Thermal cut-out
Sectionneur	Disconnect switch
Semiconducteurs	Solid-state
Sous-station de distribution	Unit sub-station
Station génératrice	Generator station
Station génératrice d'électricité	Electric generator station
Support isolant	Supporting insulator

Anglais	Français
Indicating lamp	Voyant lumineux
Isolating switch	Interrupteur d'isolement de ligne
Lead-covered cable	Câble sous plomb
Lighting outlet	Prise lumière
Lighting panel	Panneau d'éclairage
Load center	Centre de distribution
Loop primary radial system	Système en étoile primaire bouclé
Man-hole	Trou d'homme
Motor branch circuit	Dérivation de force motrice
Outdoor utility pole	Poteau de réseau extérieur
Outlet	Prise de courant
Overhead wire system	Système de câbles aériens
Panelboard	Tableau de distribution
Pole transformer	Transformateur de distribution
Power feeder	Ligne d'alimentation
Power line	Ligne de transmission
Power plant	Centrale électrique
Power station	Centrale électrique
Pulsating current	Courant pulsé
Raceway	Canalisation
Rectification	Redressement
Rectifier	Redresseur
Rectifying element	Élément de redresseur
Reverse bias	Polarisation inverse
Reverse blocking current	Courant inverse de blocage
Ripple frequency	Fréquence d'ondulation
Motor control circuit	Circuit de commande de moteur
Primary radial system	Système primaire de distribution en étoile
Safety switch	Interrupteur de sécurité
Semiconductor diode	Diode semi conductrice
Semiconductor rectifier	Redresseur semi-conducteur
Service area	Zone desserte
Service drop	Desserte
Service entrance	Amenée de courant
Shielding	Blindage/armature
Silicon controlled rectifier	Redresseur commandé au silicium (SRC)
Single crystal chip	Puce monocristalline
Single junction transistor	Transistor unijonction
Smooth current	Courant filtré
Solid-state	Semiconducteurs (A)
Spindle	Axe
Standard receptacle outlet	Prise de courant standard
Steam drum	Collecteur de vapeur
Steam-line	Conduite de vapeur
Subtransmission line	Ligne de transmission secondaire

Français	Anglais
Surcharge électrique	Electrical overload
Système de câblage	Wiring system
Système de câbles aériens	Overhead wire system
Système en étoile primaire bouclé	Loop primary radial system
Systène en étoile simple	Conventionnal simple radial
Système primaire de distribution en étoile	Primary radial system
Système souterrain	Underground system
Tableau de commande	Switchboard
Tableau de distribution	Panelboard
Thyratron	Thyratron
Transformateur de distribution	Pole transformer
Transistor unijonction	Single junction transistor
Trou d'homme	Man-hole
Voyant lumineux	Indicating lamp
Zone de desserte	Service area

Anglais	Français
Supporting insulator	Support isolant
Surge (of current)	Pointe de courant
Surge (of current)	Crête de courant
Switchboard	Tableau de commande
Switchgear	Appareillage de connexion
Tap	Prise
Test switch	Interrupteur d'essai
Thermal cut-out	Rupteur thermique
Through	Chemin de câble
Thyratron	Thyratron
Tie line	Ligne interconnectée
Flicker (to)	Osciller
Top box	Boîte de prise
Transmission line	Ligne de transmission
Trolley	Baladeur
Underground system	Système souterrain
Unit sub-station	Sous-station de distribution
Voltage dip	Chute de tension
Water tube condenser	Condensateur tubulaire
Wireway	Passe-fils
Wiring system	Système de câblage

Types de circuits électriques

AF0208

Types de circuits électriques

Objectifs d'enseignement

Dans le présent cours, vous constaterez que les circuits électriques sont désignés en fonction de leurs caractéristiques ou de leur application. Les termes descriptifs relatifs aux caractéristiques du circuit, comme la tension ou l'intensité, sont généralement très précis. Les termes descriptifs relatifs aux applications, même s'ils sont généraux, sont très utiles pour définir les caractéristiques du circuit.

À la fin du présent cours, vous devriez être en mesure:

- *D'identifier les circuits électriques en fonction de leurs caractéristiques.*
- *D'énumérer plusieurs caractéristiques qui servent à décrire un circuit relativement à une charge particulière.*
- *De monter des composants électriques dans des circuits-série et des circuits parallèle.*
- *De commander des charges électriques à partir d'un ou de deux interrupteurs.*
- *De décrire comment le courant circule dans un circuit à trois fils.*
- *D'expliquer la différence entre un circuit monté en triangle et un circuit monté en étoile.*
- *D'expliquer comment la mise à la terre d'un circuit en augmente la sécurité.*
- *D'établir la différence entre un circuit de commande et un circuit de puissance.*

Table des matières

Principes fondamentaux des circuits

Définition d'un circuit 299
Composants d'un circuit 299
Dispositifs électriques 300
Types de circuits 301
Exercice de contrôle 1 303

Circuits particuliers

Montage des circuits

Circuits-série et circuits parallèle 304
Circuit mixte simple 305
Circuits commandés par un seul interrupteur 306
Circuits commandés par deux interrupteurs 307

Caractéristiques des circuits

Variables d'un circuit électrique 308
Types de distribution électrique 308
Circuits à deux fils et à trois fils 309
Circuits monophasés 310
Circuits triphasés 311
Circuits montés en triangle 311
Circuits montés en étoile 312
Circuits mis à la terre 314
Description d'un circuit 315
Exercice de contrôle 2 317

Catégories générales de circuits

Description du circuit d'après le type d'abonné 319
Description du circuit d'après la sous-division du système électrique 319
Réseau industriel type 320
Description du circuit d'après le type de charge 321
Description d'un circuit d'après la fonction ou le dispositif de commande 322
Circuits de commande 323
Éléments communs à tous les circuits 325
Exercice de contrôle 3 326

Examen personnel 327

Lexiques 329

Principes fondamentaux des circuits

1 Définition d'un circuit

Dans la profession, le terme *équipement électrique* a une acception très large. Il désigne tout matériel, accessoire, dispositif, appareil ou appareillage faisant partie d'une installation électrique ou associé à cette installation. les mots *équipement* et *composant* sont utilisés indifféremment parce que chaque équipement est un composant de l'installation électrique. Lorsque des composants électriques sont convenablement raccordés entre eux, ils forment un circuit électrique. Il n'est pas si facile de donner la définition d'un circuit électrique, mais nous allons quand même essayer de le faire: en substance, un circuit électrique est le *trajet complet d'un courant électrique*.

Selon le type et la taille de l'installation électrique *complète*, un circuit électrique peut comporter différentes sources d'alimentation. Par exemple, on peut dire qu'une prise de courant électrique est une source d'alimentation. Par conséquent, toute charge électrique branchée sur cette prise est considérée comme un *composant* du circuit. Le circuit de cette charge commence à la prise, circule dans la charge et revient à la prise.

On peut également dire que le panneau de distribution local constitue la source d'alimentation. En tant que tel, un circuit type, appelé dérivation, commence au panneau de distribution et alimente plusieurs prises et circuits d'utilisation individuels pour revenir au panneau. Nous venons de décrire deux types de circuits différents: le *circuit d'utilisation* et le *circuit de dérivation*, respectivement. Nous allons maintenant étudier les composants d'un circuit électrique.

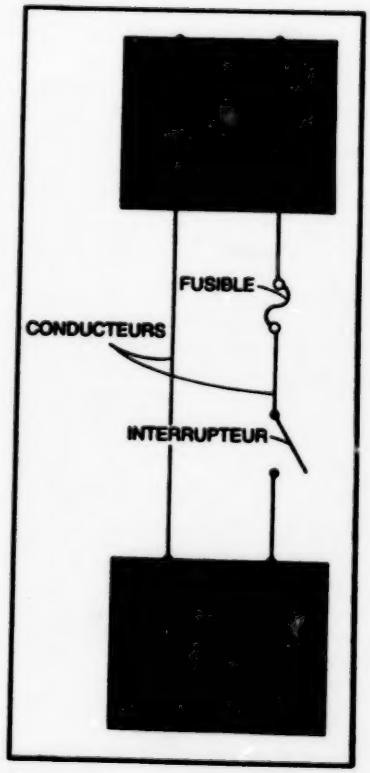


Fig. 1. Dans ce circuit simple, la source est un transformateur et la charge électrique, une lampe. Le circuit serait complet même sans interrupteur ni fusible.

2 Composants d'un circuit

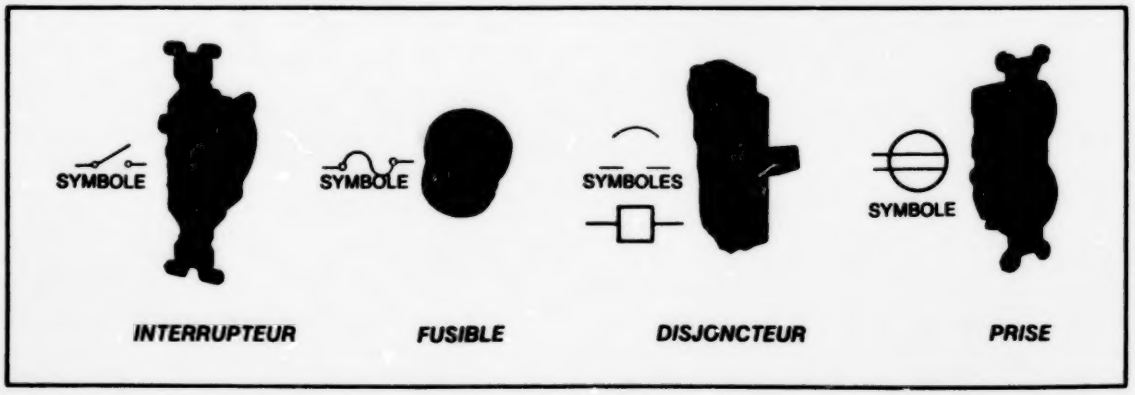
Tous les circuits électriques comprennent souvent les cinq composants de base (au moins trois) représentés à la **figure 1**. Les trois

composants que l'on retrouve dans tous les circuits sont la source d'alimentation, la charge et les conducteurs qui les relient. La source d'alimentation peut être un panneau de distribution, une prise de courant, un transformateur, un accumulateur ou un générateur. Dans certains cas, le même équipement peut être utilisé comme source pour un circuit et comme charge pour un autre circuit. Par exemple, un transformateur peut servir de charge dans un circuit d'alimentation principal, et de source d'alimentation d'une ou de plusieurs dérivations.

3 Dispositifs électriques

Un dispositif électrique est un équipement électrique qui conduit l'électricité sans utiliser ni consommer d'énergie électrique. Quelques dispositifs électriques de base sont représentés à la figure 2. La plupart des circuits contiennent un ou plusieurs dispositifs électriques, comme l'interrupteur qui est un dispositif de *commande* ou le fusible qui est un dispositif de *protection*. De nombreux circuits sont également munis de disjoncteurs qui protègent et commandent à la fois le circuit. La prise de courant (également appelée sortie) est un dispositif utilitaire qui s'utilise avec une fiche mâle. **La fiche permet de raccorder facilement un conducteur entre la source et une charge**.

Fig. 2. Les dispositifs électriques de base représentés ici sont en général utilisés séparément. Cependant, il arrive qu'un interrupteur et une prise soient montés dans la même boîte et que des fusibles et des disjoncteurs soient combinés dans le même panneau de distribution.



4 Types de circuits

Les circuits électriques portent des noms différents: **circuits série, circuits de dérivation**, circuits 120 V (volts), **circuits à haute tension et circuits de télécommande**. Ces appellations sont parfois très ambigues, surtout lorsque le même circuit est désigné par des noms différents. Il arrive souvent que l'on combine différents noms pour donner une description complète et précise du circuit.

La liste suivante montre la façon de décrire les circuits en fonction de leurs caractéristiques.

Caractéristiques du circuit	Termes descriptifs courants
Montage, raccordement, couplage	Série, parallèle, mixte, en triangle, en étoile
Nombre de fils	Deux fils, trois fils, quatre fils
Nombre de phases	Monophasé, polyphasé, triphasé
Type de mise à la terre	Neutre à la terre, neutre non mis à la terre, à la terre
Variables électriques	Haute tension, basse tension intensité admissible élevée, puissance, 60 Hz (hertz), fréquence, faible capacité, impédance élevée
Méthode de câblage	Câble, gaine de distribution, canalisation de câbles, conduite.

Les circuits peuvent également être classés en fonction du type d'abonné, de la zone desservie, d'une partie de l'installation totale, du type de charge, de la fonction et même de la méthode de commande utilisée.

La liste suivante donne les termes descriptifs courants correspondant à ces différentes catégories.

Catégories de circuits	Termes descriptifs courants
Type d'abonné	Résidentiel, commercial, industriel
Zone desservie	Dangereuse, extérieure, salle d'eau
Partie de l'installation	Amenée de courant, ligne d'alimentation, dérivation
Type de charge	À usage général, éclairage, petit électroménager
Fonction	Force, télécommunications, alarme, commande
Méthode de commande	Manuelle, automatique, télécommande.

Il arrive souvent qu'un circuit n'appartienne pas à une catégorie bien définie. Le nom utilisé, à un moment donné, dépend des caractéristiques particulières du circuit en question, au moment considéré.

Exercice de contrôle 1

Vous allez maintenant faire une pause pour revoir quelques points-clés. Si vos réponses sont différentes des nôtres, vous trouverez l'explication en vous reportant à la section indiquée vis-à-vis chaque réponse.

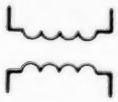
Vos réponses

1. Au sens strict, un courant électrique commence à la source _____ . — 1. _____

2. Quels sont les deux composants de la figure 1 qui assurent la protection et la commande du circuit? — 2. _____ _____

3. Une pièce d'équipement qui conduit l'électricité sans l'utiliser ni la consommer est appelée _____ . — 3. _____

4. Un équipement électrique qui assure la protection du circuit est représenté par le symbole _____ . — 4. _____

A. 

C.

B.

D.

5. Nommez deux types de montages. — 5. _____ _____

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 1

1. d'alimentation — Section 1 — 4. *D* — Section 3, figure 2
2. Fusible (disjoncteur) — 5. Série — Section 4
   Interrupteur — Sections 2, 3, figure 1 — Parallèle (Vous pouvez également donner comme réponse les montages mixtes, en triangle ou en étoile.)
3. dispositif — Section 3

Circuits particuliers

MONTAGE DES CIRCUITS

5 Circuits-série et circuits parallèle

Lorsque plusieurs pièces ou dispositifs sont utilisés dans une installation (ou appareil) électrique, leurs circuits respectifs peuvent être interconnectés de différentes manières. Les deux montages élémentaires des circuits électriques sont les montages en série et les montages en *parallèle*.

Dans un *circuit série*, toutes les pièces sont montées bout à bout, comme les maillons d'une chaîne. Ce type de montage forme un circuit fermé comme le montre la **figure 3**. La règle fondamentale qui s'applique pour un circuit monté en série est que *le même courant circule dans chaque partie du circuit*. Si un courant de 10 A passe dans l'interrupteur, un courant de 10 A passera également dans le fusible et dans chacune des résistances (éléments chauffants). Cependant, la chute de tension est différente dans chaque élément du circuit-série et dépend de la résistance de chacun des éléments chauffants et de l'intensité du courant qui les traverse.

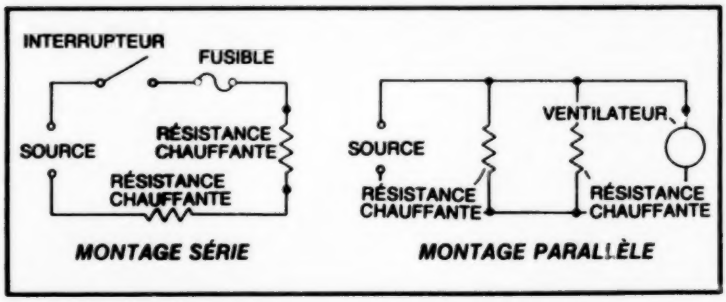


Fig. 3. Lorsqu'un circuit-série est coupé (ou ouvert) en un point, l'ensemble du circuit est hors tension: le courant ne circule dans aucune partie du circuit. Dans un circuit parallèle, lorsque l'une des branches est déconnectée (ou ouverte), le courant continue de passer dans les autres branches. Donc, s'il y a un circuit ouvert dans une branche d'un circuit parallèle, cela n'empêche pas le courant de circuler dans les autres branches.

L'autre circuit de base est le circuit monté en parallèle. Dans un circuit parallèle, on trouve deux ou plusieurs composants raccordés aux bornes de la même source de tension (fig. 3, à droite). On dit que les deux résistances (éléments chauffants) et le ventilateur sont montés en parallèle ou en dérivation par rapport à la source. La règle fondamentale qui s'applique à un circuit parallèle est que la même tension existe aux bornes de chacun des composants montés en parallèle. Le courant se divise et une partie de ce der-

nier traverse chacune des branches en parallèle. **Plus la résistance d'une branche est élevée, plus le courant qui la traverse est faible.**

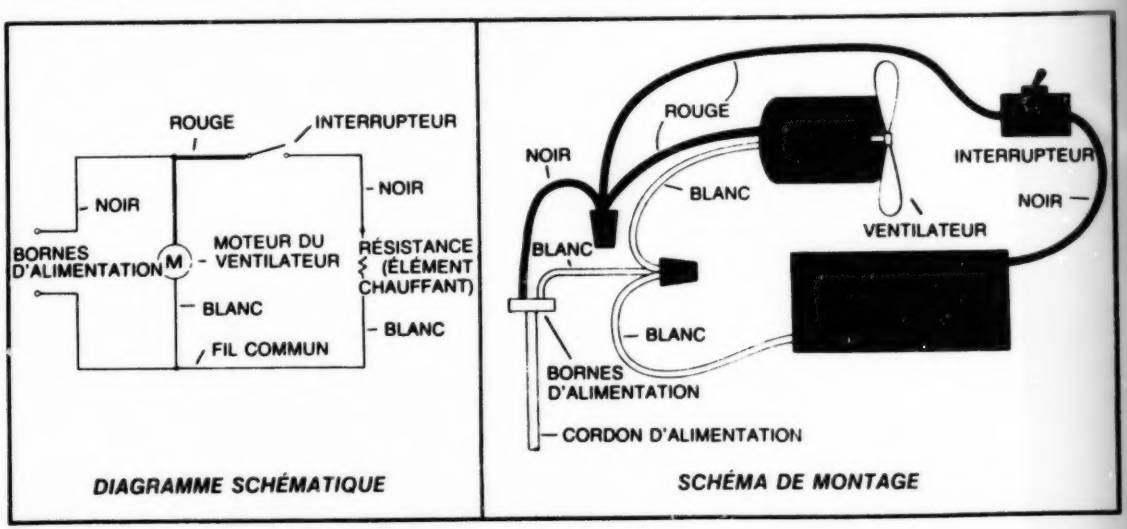
Il existe un grand nombre de combinaisons possibles de montages-série et parallèle dans les circuits électriques. Mais les circuits mixtes peuvent facilement être ramenés à des circuits simples pour les vérifications.

6 Circuit mixte simple

Les composants d'un circuit peuvent être montés pour former une combinaison de circuits série et de circuits parallèle. Voyons par exemple le circuit de la résistance (élément chauffant) représenté à la **figure 4**. Dans le schéma de principe, vous pouvez constater que la résistance et l'interrupteur sont montés en *série* et que le moteur du ventilateur est monté en *parallèle* sur eux. Le circuit se compose de deux branches en parallèle. L'une d'elles n'a qu'un seul composant, le moteur du ventilateur, et la deuxième comprend deux composants en série, la résistance et l'interrupteur. **Il s'agit d'une combinaison série-parallèle que l'on appelle *circuit mixte*.**

La représentation schématique de la figure 4 montre les couleurs des fils. Vous observerez qu'un côté de chaque branche comprend un fil blanc. Ces fils blancs sont raccordés au fil blanc commun qui est lui-même relié à une borne d'alimentation. Le fil rouge

Fig. 4. Cette figure représente le diagramme schématique et le schéma de montage du même radiateur électrique. Dans ce radiateur, l'interrupteur ne commande que l'élément chauffant et non le ventilateur. On peut également utiliser des fils blancs pour les fils neutres ou communs dans les circuits.



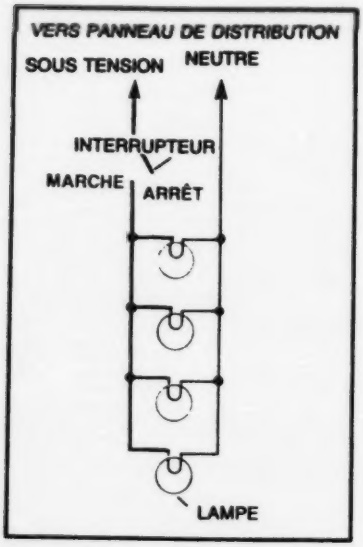


Fig. 5. Le fil sous tension est généralement isolé en noir. L'isolant blanc ou gris est réservé au fil neutre indiqué dans le schéma par les lignes plus fines. L'isolant de couleur verte est réservé au fil de terre (non représenté dans ce circuit).

de l'interrupteur et le fil rouge du moteur de ventilateur sont raccordés au fil noir. Le fil noir est raccordé à l'autre borne d'alimentation. Vous devez vous souvenir que le fil commun est blanc et que tous les fils blancs sont raccordés entre eux.

Nous avons déjà dit que la même tension est appliquée aux bornes de chaque branche d'un circuit parallèle. C'est pour cette raison que les charges électriques sont conçues pour fonctionner à des tensions nominales précises. Nous avons également dit que, dans une maison type, toutes les charges fonctionnent sous une tension de 120 ou 240 V. Les équipements industriels sont fabriqués pour fonctionner à ces tensions ou à des tensions plus élevées. Quelle que soit la tension, toutes les charges sont montées en parallèle sur la source.

Les dispositifs électriques, qui protègent et commandent l'ensemble ou une branche du circuit, sont montés en série avec la partie du circuit ou la charge qu'ils protègent ou commandent. C'est pour cette raison que la tension nominale de dispositifs électriques tels que fusibles, disjoncteurs et interrupteurs est calculée en fonction de l'intensité du courant qu'ils sont appelés à supporter. Nous allons maintenant examiner quelques circuits types d'interrupteurs.

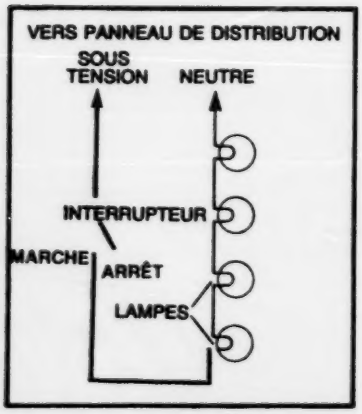


Fig. 6. Des guirlandes d'ampoules en série comme celle représentée dans ce schéma, étaient très couramment utilisées dans les arbres de Noël. Si une ampoule brûle, le circuit s'ouvre et toutes les autres ampoules s'éteignent.

7 Circuits commandés par un seul interrupteur

L'interrupteur est couramment utilisé pour commander une charge à partir d'un endroit approprié. L'interrupteur est monté en *série* avec la charge qu'il commande. Lorsqu'un interrupteur commande plusieurs charges, il est alors monté en série avec l'ensemble des charges *alors* que ces dernières sont elles-mêmes montées en parallèle. Dans le circuit parallèle représenté à la **figure 5** par exemple, un seul interrupteur commande *les* quatre lampes.

Lorsque l'interrupteur est fermé, le courant traverse entièrement le circuit parallèle et toutes les lampes s'allument. Si une lampe brûle ou est enlevée, les autres lampes restent allumées parce que le circuit qui traverse chacune d'elles est *complet*.

Lorsque les lampes sont montées en série comme à la **figure 6**, elles s'allument aussi lorsque l'interrupteur est fermé (circuit fermé). Cependant, lorsqu'on enlève une lampe, le circuit est coupé et *aucune* lampe ne s'allume, même si l'interrupteur reste fermé. Lorsque des lampes sont montées en série, elles doivent toutes être de la même taille. Dans le cas contraire, les plus petites lampes consomment

plus de puissance et produisent une lumière plus intense que la normale; les plus grosses lampes consomment *moins* de puissance et dégagent une lumière plus faible que la normale. C'est une autre raison pour éviter les montages en série pour l'éclairage général.

Lorsque plusieurs interrupteurs commandent des lampes individuellement, les interrupteurs et les lampes doivent être montés selon le schéma de la **figure 7**.

L'électricien doit observer les règles suivantes pour le montage des interrupteurs: toujours monter un interrupteur en série avec la charge qu'il commande; toujours placer les interrupteurs dans la partie non mise à la terre ou sous tension du circuit.

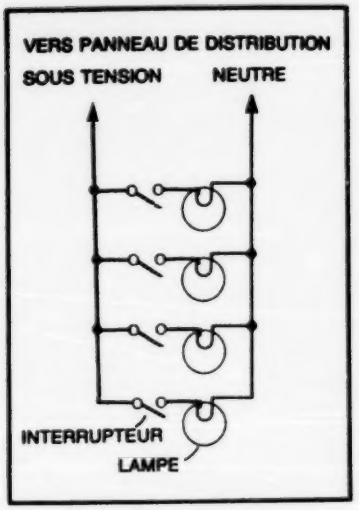


Fig. 7. Ce circuit parallèle est une dérivation type; n'importe quelle combinaison de lampes peuvent être allumées à tout moment.

8 Circuits commandés par deux interrupteurs

Pour commander une charge à partir de deux points, on utilise deux commutateurs à trois directions. Le schéma de circuit et le schéma de montage illustrant la commande d'un groupe de quatre lampes munies de commutateurs à trois directions sont représentés à la **figure 8**. Les commutateurs à trois directions *A* et *B* raccordent les lampes *1* et *2* ou *1* et *3*, *selon la position de la manette de commande*. Un conducteur non mis à la terre desservi par le centre de distribution est *raccordé à la borne commune 1 du commutateur A*. Vous noterez également qu'un conducteur raccorde un côté de chaque lampe à la borne *1* du commutateur *B*.

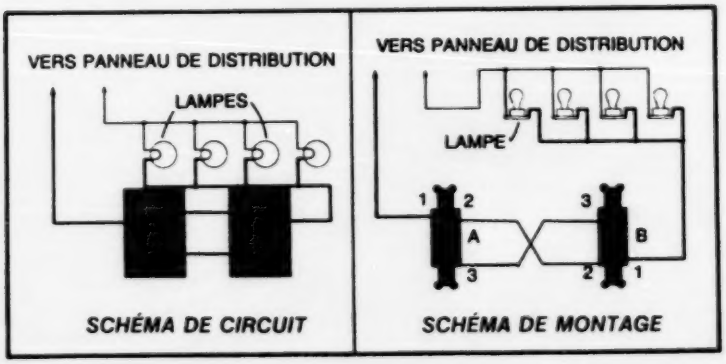


Fig. 8. Des noms spéciaux sont parfois utilisés pour désigner les fils d'un circuit. Par exemple, les fils qui raccordent les deux commutateurs à trois directions sont appelés des *fils voyageurs*. (*A* et *B* sont des commutateurs à trois directions avec des bornes *1*, *2* et *3*'.) Le fil non mis à la terre raccordant le centre de distribution à la borne 1 du commutateur A est appelé fil chargé. Le fil neutre raccordant le centre de distribution aux lampes est appelé fil identifié ou de retour.

1. Il existe d'autres terminologies pour désigner ce type d'interrupteur:
   — commutateur bidirectionnel ou à deux directions
   — interrupteur va-et-vient
   — interrupteur d'escaliers

Là encore, seul le fil non mis à la terre est raccordé au commutateur. Les autres bornes correspondantes des interrupteurs sont raccordées entre elles: *2* à *2* et *3* à *3*. Si les mauvaises bornes sont raccordées, les lampes ne s'allument pas. Heureusement, le câblage ne risque pas d'être endommagé en cas de mauvais raccordement entre les commutateurs.

(Le schéma de montage de la **figure 8** sert uniquement à illustrer cette discussion. En aucun cas, *il ne doit servir de référence pour raccorder un commutateur à trois directions*: les positions réelles des bornes d'un commutateur varient en fonction du type de commutateur et du fabricant.)

CARACTÉRISTIQUES DES CIRCUITS

9 Variables d'un circuit électrique

La plupart des circuits que vous rencontrerez seront des circuits montés en parallèle où la tension est la même pour toutes les charges montées en parallèle. Supposons que vous deviez installer une nouvelle charge électrique dans un circuit parallèle. Vous devez connaître la tension de service du circuit, ainsi que son intensité admissible[1]. L'intensité et la tension ne sont que deux des nombreuses variables électriques qui servent à décrire ou à désigner un circuit. Les autres caractéristiques sont la résistance, la capacité, l'impédance et la fréquence.

Examinons par exemple un circuit de 120 V, 15 A. Vous savez que les charges doivent être montées en parallèle. Vous savez également que ce circuit fonctionne sous 120 V et que l'intensité totale des charges en parallèle ne peut être supérieure à 15 A.

10 Types de distribution électrique

La plupart des compagnies d'électricité produisent et distribuent aux abonnés du courant alternatif. (Le courant continu n'est pratiquement plus distribué). Cependant, tout électricien d'entretien industriel peut encore avoir à travailler sur des circuits à c.c.

1. Le terme «ampérage» s'emploie également à la place d'«intensité admissible».

cuits peuvent être alimentés par des convertisseurs c.a.-c.c. ou des accumulateurs, et être utilisés pour les circuits de secours et les circuits spéciaux de régulation de la vitesse des moteurs. Puisque les électriciens d'entretien industriels risquent moins d'avoir à travailler à des circuits à c.c., nous ne parlerons ici que des circuits à c.a.

11 Circuits à deux fils et à trois fils

Les circuits dont nous avons parlé jusqu'à présent étaient des *circuits à deux fils*, comprenant un fil sous tension non mis à la terre et un fil neutre mis à la terre. Si deux circuits de ce type sont utilisés au même endroit, on compte un total de quatre fils, comme à la **figure 9**. Vous observerez que les lignes *a* et *b* représentent des fils non mis à la terre *et* que les autres lignes *n* sont des fils neutres. Ces neutres sont raccordés à la même barre omnibus neutre du panneau de distribution. Si les fils *a* et *b* sont raccordés aux fils opposés de la ligne d'amenée de courant, le courant circule dans la direction indiquée par les flèches. «Aux fils opposés de la ligne d'amenée de courant» signifie que, si le fil *a* est raccordé au fil noir de la ligne d'amenée de courant, la ligne *b* est raccordée au fil rouge de la ligne d'amenée de courant. La tension entre les fils *a* et *n* (ou *b* et *n*) est de 120 V, alors qu'entre les fils *a* et *b*, elle est de 240 V.

Puisque les fils neutres sont raccordés ensemble dans le panneau de distribution, ils constituent en réalité un seul fil. Pourquoi utiliser deux fils quand un seul suffit? Un circuit à trois fils 120 V/240 V peut remplir les mêmes fonctions que deux circuits à deux fils 120 V.

Examinons le cas de la **figure 9**, où l'on trouve des charges équivalentes dans le circuit à trois fils. Supposons que chaque charge consomme 20 A. Dans ce cas, un courant de 20 A passe dans les fils a et b, mais les deux flèches tracées sur le neutre n vont dans des directions opposées. **Donc, les courants s'annulent et aucun courant ne passe dans le neutre.** Il s'ensuit qu'il n'y a aucune chute de tension dans le neutre et qu'une chute de tension moindre se produit dans chaque circuit.

Lorsque les courants dans les fils chargés a et b sont inégaux, encore là, le courant qui passe dans le neutre est plus faible que le plus élevé des courants transportés par les fils a et b. Par exemple, si un courant de 20 A passe dans le fil a et un courant de 15 A dans le fil b, un courant de $20 - 15 = 5$ A circule dans le neutre. Même si le courant du neutre n'est plus égal à zéro, il est néanmoins nettement plus faible que le courant plus élevé qui passe dans l'un ou l'autre des fils chargés a et b. Les charges individuelles représentées sur la **figure 9** peuvent être remplacées par plu-

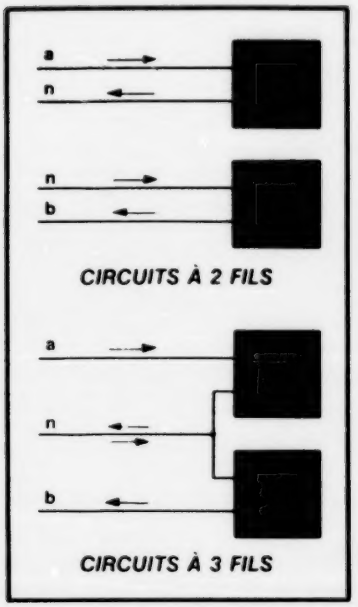


Fig. 9. Ce schéma montre la façon dont se combinent deux circuits à deux fils munis de fils sous tension *a* et *b* pour constituer un circuit à trois fils ayant un neutre commun *n*. Le circuit à trois fils est couramment utilisé dans les installations résidentielles et industrielles 120 V/240 V.

sieurs charges plus petites placées de manière appropriée, à condition qu'elles soient à peu près également réparties entre les deux côtés du circuit.

12 Circuits monophasés

Le courant alternatif monophasé est distribué dans des circuits à deux et à trois fils. En règle générale, les circuits à trois fils sont utilisés dans la plupart des applications monophasées, comme le service des abonnés résidentiels, des grands magasins et des petites entreprises. Le courant monophasé est fourni par un transformateur de distribution comme le montre la **figure 10**. L'enroulement primaire du transformateur de distribution est alimenté par un réseau haute tension de 6 900 V par exemple. La tension est *abaissée* dans le transformateur, puis acheminée à l'abonné à partir de l'enroulement secondaire. L'abonné reçoit du 120/240 V par l'intermédiaire de circuits à trois fils (*a*, *b* et *n*) qui sont raccordés à l'enroulement secondaire du transformateur.

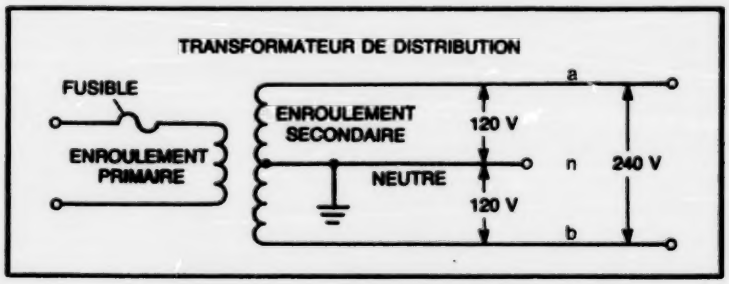


Fig. 10. Ce circuit de distribution à trois fils monophasé permet de comprendre la façon dont le circuit à trois fils représenté à la figure 9 était alimenté en 120/240 V. Dans la pratique, le neutre d'un tel circuit est mis à la terre.

Dans les circuits de distribution à trois fils, une tension de 120 V est fournie entre l'un des deux fils extérieurs et la ligne centrale (ou neutre), et une tension de 240 V est fournie entre les deux lignes extérieures. Les connexions sous 120 V sont utilisées pour l'éclairage et les petits appareils électriques, tandis que les connexions sous 240 V sont utilisées pour les charges plus puissantes, telles que radiateurs électriques et compresseurs d'air.

L'alimentation monophasée à 120/240 V utilise trois fils et un neutre continu. «Neutre continu» signifie que le fil neutre n'est pas interrompu par un fusible, un interrupteur ou un autre dispositif. Les deux tensions séparées par une barre oblique signifient que deux tensions sont disponibles dans le circuit de distribution à trois fils. Ce sont les tensions que vous rencontrerez dans les circuits de dérivation industriels.

13 Circuits triphasés

Les circuits polyphasés sont utilisés presque exclusivement dans les installations commerciales et industrielles où la totalité de la charge est essentiellement constituée par des moteurs de grande puissance ou plusieurs moteurs de faible puissance. Des moteurs de 3 hp (horsepower) ou plus sont considérés comme des moteurs de grande puissance. Le préfixe «poly» signifie plusieurs. Dans la plupart des applications électriques, lorsque *poly* se rapporte au nombre de phases, cela signifie biphasé ou triphasé.

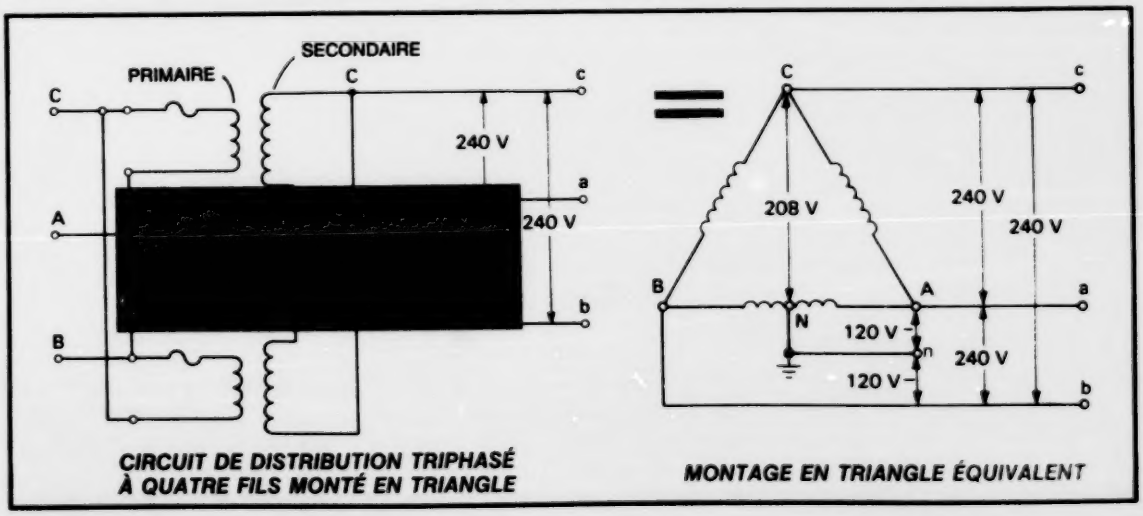
Les circuits de distribution biphasés sont rarement utilisés de nos jours. Lorsqu'on rencontre néanmoins de tels circuits, il s'agit généralement de vieux circuits biphasés à quatre ou cinq fils.

Lorsqu'une distribution polyphasée est requise, on prévoit généralement un circuit triphasé. Les distributions et les circuits triphasés peuvent être divisés selon deux types de montage: en triangle (Δ) et en étoile (Y). Les symboles Δ et Y décrivent la configuration des montages triphasés. Dans un circuit en triangle, les trois phases sont raccordées bout à bout en boucle fermée. Dans un circuit en étoile, les trois phases sont raccordées ensemble en un point commun.

14 Circuits montés en triangle

La **figure 11** représente un circuit type monté en triangle. Il s'agit ici d'une distribution triphasée à quatre fils de 120/240 V. Ce type

Fig. 11. Ces schémas montrent comment le montage en triangle d'un circuit ressemble à la lettre grecque Δ. Vous observerez, dans le schéma de gauche, comment le circuit monophasé 120/240 V (zone ombrée) est dérivé d'un système triphasé 240 V monté en triangle.



de circuit est constitué en montant en triangle ou en série, les trois secondaires du transformateur pour former une boucle fermée. Les points de jonction *A*, *B* et *C* sont raccordés respectivement aux fils *a*, *b* et *c*. L'enroulement du transformateur entre les points de jonction *A* et *B* est muni d'une prise médiane en *N*. Ainsi, le fil *n* raccordé au point *N* est à la fois le fil neutre et le quatrième fil du circuit triphasé. Les tensions fournies sont de 240 V entre *a* et *b*, *b* et *c* et *a* et *c*; de 120 V entre *a* et *n* et *b* et *n*; et de 208 V entre *c* et *n*. La tension entre *c* et *n* est beaucoup trop élevée pour les charges de 120 V et beaucoup trop faible pour les charges de 240 V. C'est la raison pour laquelle aucune charge n'est raccordée entre ces deux fils (*c* et *n*).

Les circuits Δ sont d'une grande souplesse d'utilisation. Ils permettent d'alimenter des charges triphasées à trois fils raccordées aux fils *a*, *b* et *c*. Ils permettent également d'alimenter des charges monophasées à deux fils, si elles sont réparties également (et raccordées entre les fils *a* et *b*, *b* et *c* et *c* et *a*). Enfin, ils permettent d'alimenter des charges 120 V monophasées à deux fils raccordés entre les lignes *a* et *n* (ou *b* et *n*).

Le circuit triphasé à quatre fils monté en triangle s'utilise dans de nombreuses applications. Certains appareils d'éclairage fluorescent sont alimentés sous 240 V, ce qui facilite l'équilibrage des charges. Lorsqu'une charge quelconque est raccordée au neutre, il y a déséquilibre des autres charges, ce qui est l'inconvénient majeur de ce type de montage. L'autre inconvénient est que les charges ne peuvent être raccordées entre les fils *c* et *n*.

L'avantage des montages Δ est que, si l'un des transformateurs tombe en panne, les deux autres transformateurs continuent de fournir une puissance triphasée. Les montages en triangle sont couramment utilisés dans les circuits d'alimentation triphasés à trois fils de 480 V.

Le symbole 3 ϕ signifie «triphasé»; la lettre grecque phi (ϕ) signifie «phase».

15 Circuits montés en étoile

Initialement, les circuits de distribution triphasés montés en Y (ou en «étoile») étaient utilisés lorsque la charge d'éclairage était importante et qu'il fallait alimenter des circuits force. Cela correspond à un circuit de distribution triphasé à quatre fils de 120/208 V monté en étoile, comme celui représenté à la **figure 12**. Une extrémité de

chaque secondaire du transformateur est raccordée au point commun *N*. Les autres extrémités des secondaires sont raccordées aux fils de la ligne d'amenée de courant, soit les fils *a*, *b* et *c*. (Ces fils sont également appelés fils de phase.) Le fil raccordé au point commun *N* est le fil neutre *n* qui est mis à la terre.

La tension entre chacun des fils *a*, *b* et *c* et le fil neutre n est de 120 V. À cause de l'interconnexion des phases, la tension ligne à ligne est égale à 1,732 × la tension phase-neutre. Par conséquent, la tension ligne à ligne est égale à 1,732 × 120 = 208 V. Les tensions ligne à ligne sont les tensions de *a* à *b*, *b* à *c* et *a* à *c*. Lorsque le circuit alimente des charges monophasées, il est important que ces charges soient équilibrées, c'est-à-dire réparties également.

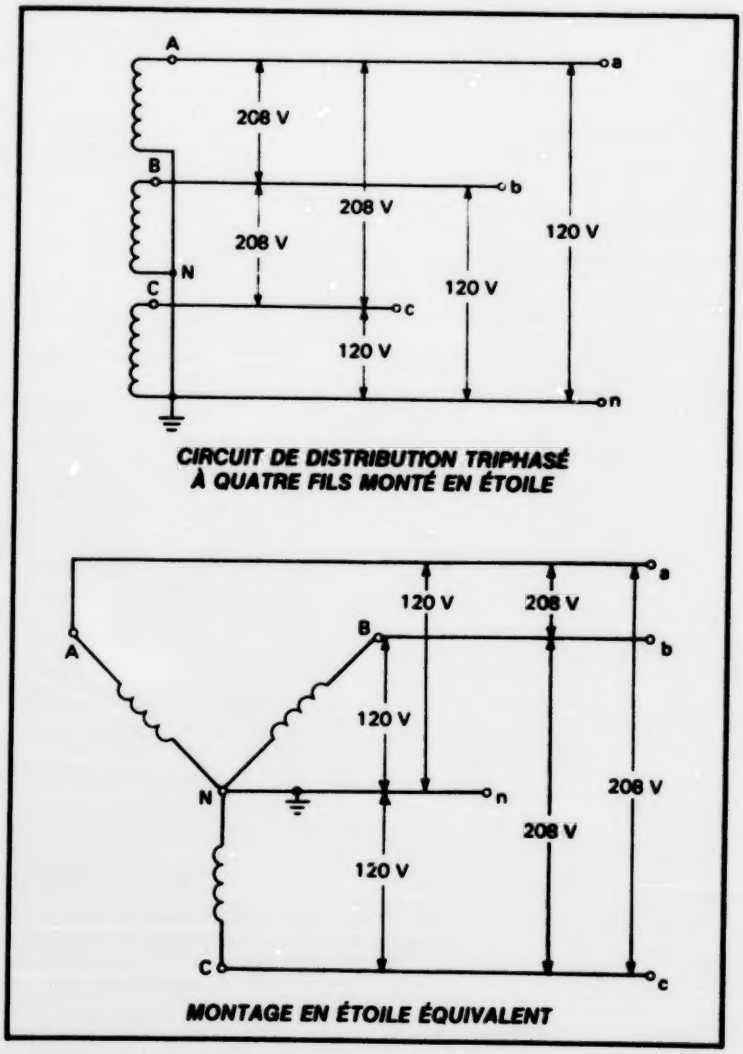


Fig. 12. Dans un circuit triphasé monté en étoile, les trois fils de phase sont tous raccordés à un point commun: le neutre.

Le circuit de distribution monté en étoile offre plus de possibilités que celui monté en triangle. Voici les charges qui peuvent être alimentées par un circuit de distribution monté en étoile:

Charges 208 V triphasées à trois fils raccordées aux fils *a*, *b* et *c*.

Charges 120/208 V triphasées à quatre fils raccordées aux fils *a*, *b*, *c* et *n*.

Charges 208 V monophasées raccordées aux fils *a* et *b*, *b* et *c*, ou *a* et *c*.

Charges 120/208 V monophasées raccordées aux fils *a*, *b* et *n*; *b*, *c* et *n*, ou *a*, *c* et *n*.

Charges 120 V monophasées raccordées aux fils *a* et *n*, *b* et *n* ou *c* et *n*.

Les charges 120 V monophasées peuvent être soit des lampes, soit des prises de courant.

De nombreux circuits montés en étoile sont souvent sous des tensions plus élevées, soit de 240/416 V ou de 277/480 V[1]. Vous devez savoir que c'est la plus haute tension qui définit la tension ligne à ligne (qui est 1,732 fois plus élevée que la tension phase-neutre). Par exemple, 240 × 1,732 = 416 V et 277 × 1,732 = 480 V. Ces tensions peuvent être utilisées pour les applications industrielles et le chauffage électrique parce qu'elles sont plus économiques à installer que les circuits 120/208 V. De plus, elles nécessitent des fils et des disjoncteurs de plus petit calibre. Par ailleurs, les circuits de distribution 416, 480 et 600 V servent à alimenter les moteurs et les installations de chauffage.

16 Circuits mis à la terre

Vous vous souvenez que, dans un circuit à deux fils, le fil neutre est raccordé à la terre, ou mis à la terre. Lorsque le fil neutre est raccordé à la terre, on dit qu'il est *mis à la terre* parce qu'il est conducteur pendant le fonctionnement normal du circuit. Un fil *de terre* est également raccordé à la terre, mais il n'est pas con-

1. Au Québec le système le plus utilisé est le 347/600 V.

ducteur pendant le fonctionnement normal du circuit. Par exemple, le fil de terre raccordé au châssis d'un moteur 240 V n'est conducteur *que* lorsqu'un court-circuit se produit entre l'enroulement et le châssis du moteur.

La mise à la terre d'un système électrique augmente sa sécurité, car elle diminue les risques de choc électrique et d'incendie. Supposons qu'une ligne de 6 900 V se décroche accidentellement et touche les fils de l'amenée de courant 120/240 V. Si ces fils ne sont pas mis à la terre, tous les fils seront *soudainement* à une tension de 6 900 V. Tout contact avec l'un de ces fils provoquerait un choc électrique de 6 900 V. Cependant, lorsque les fils de l'amenée de courant 120/240 V sont mis à la terre, le danger est réduit. Du fait que le fil neutre du système électrique est mis à la terre, comme le montre la **figure 13**, la tension du fil à 120 V est supérieure à sa tension normale de 120 V, mais est nettement inférieure à une tension de 6 900 V. La tension des fils ne peut atteindre 6 900 V parce qu'il existe un chemin de faible résistance qui part du supérieur sous tension, traverse l'enroulement du transformateur et aboutit à un fil neutre mis à la terre.

Le fil neutre doit être continu. Dans les circuits résidentiels, il *n'est jamais* interrompu par un fusible, un disjoncteur, un interrupteur ou autre dispositif. Dans les circuits industriels, le fil neutre peut être interrompu, à condition que le dispositif interrompe en même temps les fils non mis à la terre et le fil neutre.

Puisque certains circuits n'ont pas besoin de fil de terre séparé, il peut être nécessaire, pour bien les définir, de spécifier si le circuit comprend ou non un fil de terre. Cela n'est pas toujours le cas pour les circuits industriels, car la fonction de mise à la terre est remplie par la canalisation.

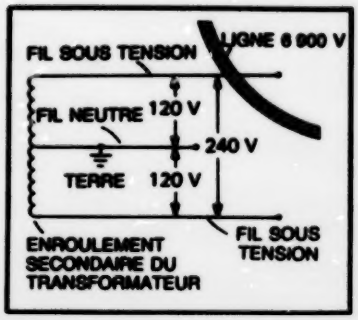


Fig. 13. La tension de l'ensemble de ce circuit serait de 6 900 V si le fil neutre n'était pas mis à la terre. Lorsqu'il est mis à la terre, ce circuit peut facilement être protégé en installant un disjoncteur ou un fusible qui ouvre le circuit en présence d'un courant de haute intensité de fuite à la terre.

17 Description d'un circuit

Jusqu'à présent, nous avons mentionné plusieurs des caractéristiques spécifiques d'un circuit. Mais vous vous demandez sans doute quelles sont les caractéristiques indispensables pour bien décrire un type de circuit. Il n'existe pas de réponse absolue à cette question. Cela dépend du réseau électrique en question, de la charge, de la fonction du circuit, entre autres facteurs.

Par exemple, dans une maison moderne, il n'est pas utile de spécifier si l'amenée de courant comprend deux ou trois fils, puisqu'on n'installe plus de ligne d'amenée à deux fils. Les circuits monophasés sont utilisés dans la plupart des réseaux de distribution résidentiels et les circuits triphasés, dans la plupart des systèmes industriels.

Exercice de contrôle 2

Il est temps de faire une deuxième pause pour vérifier vos connaissances. Comparez vos réponses aux nôtres et, au besoin, révisez les sections citées en référence dans les réponses.

Vos réponses

1. Le type de circuit dans lequel les dispositifs électriques individuels sont raccordés bout à bout est appelé circuit (parallèle, série) _____ . — 1. _____

2. On trouve la même tension dans chaque branche d'un circuit monté en _____ . — 2. _____

3. Lequel des circuits représentés ci-dessous est un circuit série? — 3. _____

A.

C.

B.

D.

4. Les dispositifs de protection et de commande sont montés en (dérivation, série) _____ avec la charge. — 4. _____

5. Pour commander une charge électrique à partir de deux endroits, vous devez prévoir deux commutateurs à (deux directions, trois directions) _____. — 5. _____

6. L'électricité est distribuée par la plupart des compagnies sous forme de courant (alternatif, continu) _____ . — 6. _____

7. Dans un circuit à trois fils de 120/240 V, si le courant dans le fil *a* est de 17 A et celui dans le fil *b* est de 8 A, le courant dans le fil neutre *n* sera de _____ A. — 7. _____

A. 8
B. 9
C. 17
D. 25

8. Lequel des circuits représentés ci-dessous représente un réseau monté en triangle? — 8. _____

A.

C.

B.

D.

9. Un (fil de terre, fil mis à la terre) _____ est raccordé à la terre et N'EST PAS conducteur de courant pendant le fonctionnement normal du circuit. — 9. _____

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 2

1. série — Section 5
2. parallèle — Section 5
3. B — Section 5, 6, figure 3
4. série — Section 6
5. trois directions — Section 8
6. alternatif — Section 10
7. *B*9 (17 - 8 = 9 A) — Section 11
8. *C* — Sections 13, 14, figure 11 (Il faut noter que les trois parties forment une boucle fermée.)
9. fil de terre — Section 16

Catégories générales de circuits

18 Description du circuit d'après le type d'abonné

Un circuit est souvent désigné d'après l'utilisateur. On peut citer en exemple les circuits résidentiels, commerciaux, industriels et agricoles. Lorsque le type d'abonné est connu, on peut faire plusieurs suppositions générales quant au type de circuit utilisé.

Par exemple, les «circuits résidentiels» sont des circuits monophasés dont la tension de service est de 120/240 V et la capacité de charge totale de 100 ou 200 A. On peut aussi raisonnablement supposer que le système comprend des câbles sous gaine non métalliques ou des câbles armés.

Les circuits dits «industriels» sont, dans la plupart des cas, des circuits triphasés; le système de câblage est formé de câbles, de conduites, de canalisations, de câbles ou de gaines de distribution. On peut également supposer que ces circuits ont des tensions et une intensité admissible supérieures à celles des circuits résidentiels.

Les circuits commerciaux et agricoles se composent souvent des mêmes équipements électriques que les circuits résidentiels et industriels. Quoique rien ne puisse être tenu pour acquis, on peut dire néanmoins que lorsque l'on connaît le type d'abonné, on peut avoir une idée générale des caractéristiques du circuit et des équipements électriques utilisés.

19 Description du circuit d'après la subdivision du système électrique

Lorsqu'on connaît le type d'abonné, on peut classer les circuits en trois catégories: *lignes d'alimentation, lignes d'alimentation secon-*

daires et *dérivations*. Tous les réseaux électriques sont constitués d'une combinaison de ces trois types de circuits. Une combinaison donnée dépend du type d'abonné et des dimensions de l'installation, à savoir du nombre et de la puissance des charges.

Par exemple, dans une installation résidentielle, tous les circuits sont normalement des *dérivations* (sauf celui de l'amenée de courant qui est défini comme un *circuit* d'alimentation). Une grande usine peut comprendre des lignes d'alimentation à haute et à basse tension, des lignes d'alimentation secondaires et des dérivations. Quelle que soit l'installation électrique, lorsque vous connaissez la sous-division à laquelle le circuit appartient, vous pouvez en déduire la plupart de ses caractéristiques: *tension de service, nombre de phases* et *type de câblage*. (Par exemple, dans une usine donnée, les lignes d'alimentation comprennent une gaine de distribution alors que les dérivations sont installées dans des canalisations rigides ou semi-rigides).

Dans une installation donnée, les circuits sont bien définis lorsqu'il s'agit des *lignes d'alimentation* ou des *lignes d'alimentation secondaires*. La désignation ne donne pas une définition aussi précise, puisque chaque dérivation est définie plus précisément par ses propres besoins en puissance.

20 Réseau industriel type

Examinons maintenant un réseau électrique industriel comme celui représenté à la **figure 14.** Dans ce réseau en étoile primaire bouclé, toutes les sections d'alimentation présentent très probablement les mêmes caractéristiques. Si tous les centres de distribution sont de la même importance, il est probable que toutes les sections d'alimentation secondaires seront semblables. Cependant, les dérivations peuvent être semblables ou non, selon la charge spécifique qu'elles alimentent.

Par exemple, dans un des circuits, la charge peut être un circuit d'éclairage monophasé de 20 A. Dans un autre circuit, la charge peut être une machine alimentée par une source triphasée à quatre fils de 50 A. Comme vous pouvez le constater, les deux circuits sont très différents.

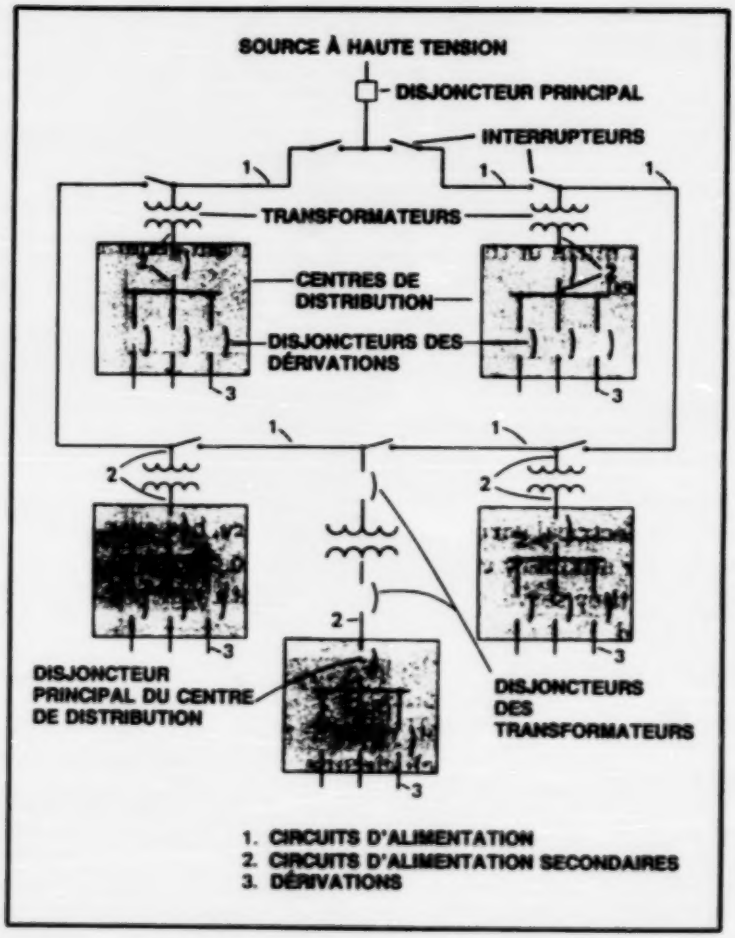


Fig. 14. Dans ce réseau en étoile primaire bouclé, seul le circuit d'alimentation secondaire de la partie inférieure centrale montre comment chaque transformateur comprend normalement des protections électriques au primaire et au secondaire.

21 Description du circuit d'après le type de charge

Un circuit est souvent désigné ou décrit d'après le type d'équipement électrique (ou charge) qu'il alimente. Par exemple, une maison est couramment équipée de circuits pour petit électroménager, cuisinière électrique, et de type universel. Chaque circuit a ses propres caractéristiques. En connaissant le type de charge, tout élec-

tricien d'expérience peut en déduire la plupart des caractéristiques du circuit, à savoir: *tension, intensité admissible, nombre de phases, nombre de conducteurs et leur calibre.*

Les dérivations industrielles ne sont pas aussi normalisées que les circuits résidentiels. Cependant, si l'on connaît la charge (moteur ou appareil d'éclairage, par exemple), on peut généralement déterminer la plupart des caractéristiques du circuit et des équipements qu'il alimente.

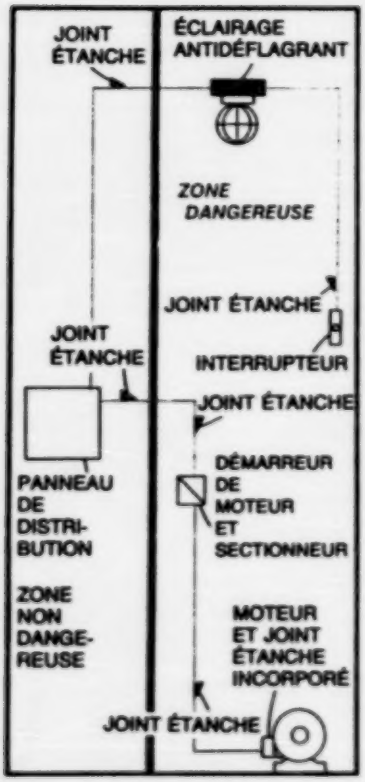


Fig. 15. Dans une zone dangereuse, tous les dispositifs électriques, canalisations et charges doivent être spécialement construits et convenablement installés.

22 Description d'un circuit d'après la fonction ou le dispositif de commande

Jusqu'à présent, nous avons parlé des types de circuits normalisés utilisés dans les systèmes de câblage électrique. Il existe cependant un grand nombre de circuits spéciaux ou auxiliaires qui sont également décrits d'après leurs fonctions ou d'après le dispositif de commande. Il s'agit des circuits d'alimentation de secours, des circuits alimentant les zones dangereuses, des circuits d'alarme, de télécommunications et de commande. Lorsque vous travaillerez dans une usine, petite ou grande, vous aurez sans aucun doute à intervenir dans certains de ces circuits, voire tous.

L'alimentation de secours peut être distribuée dans une usine de deux manières différentes. Dans le premier cas, l'alimentation de secours, soit un groupe Diesel ou un accumulateur, peut être directement connectée au circuit d'alimentation principal ou aux dérivations. Dans l'autre, le système de secours peut comprendre ses propres circuits d'alimentation et dérivations. Dans les deux cas, vous devez connaître les circuits d'alimentation et les dérivations, *ainsi que* les circuits de commande utilisés pour commuter de la source d'alimentation principale à la source de secours.

La caractéristique principale du circuit «alimentant une zone dangereuse» est qu'il comprend des garnitures et des dispositifs antidéflagrants. Les charges électriques raccordées à ces circuits, comme le moteur et la lampe représentés à la **figure 15**, doivent être de construction spéciale.

La plupart des circuits alimentant des charges électriques de faible puissance comme les circuits d'alarme, peuvent être alimentés en basse tension alternative ou continue. On peut notamment citer les circuits de sonnette, d'alarme-incendie et de commande qui sont alimentés par une source basse tension de 12, 16 ou 24 V.

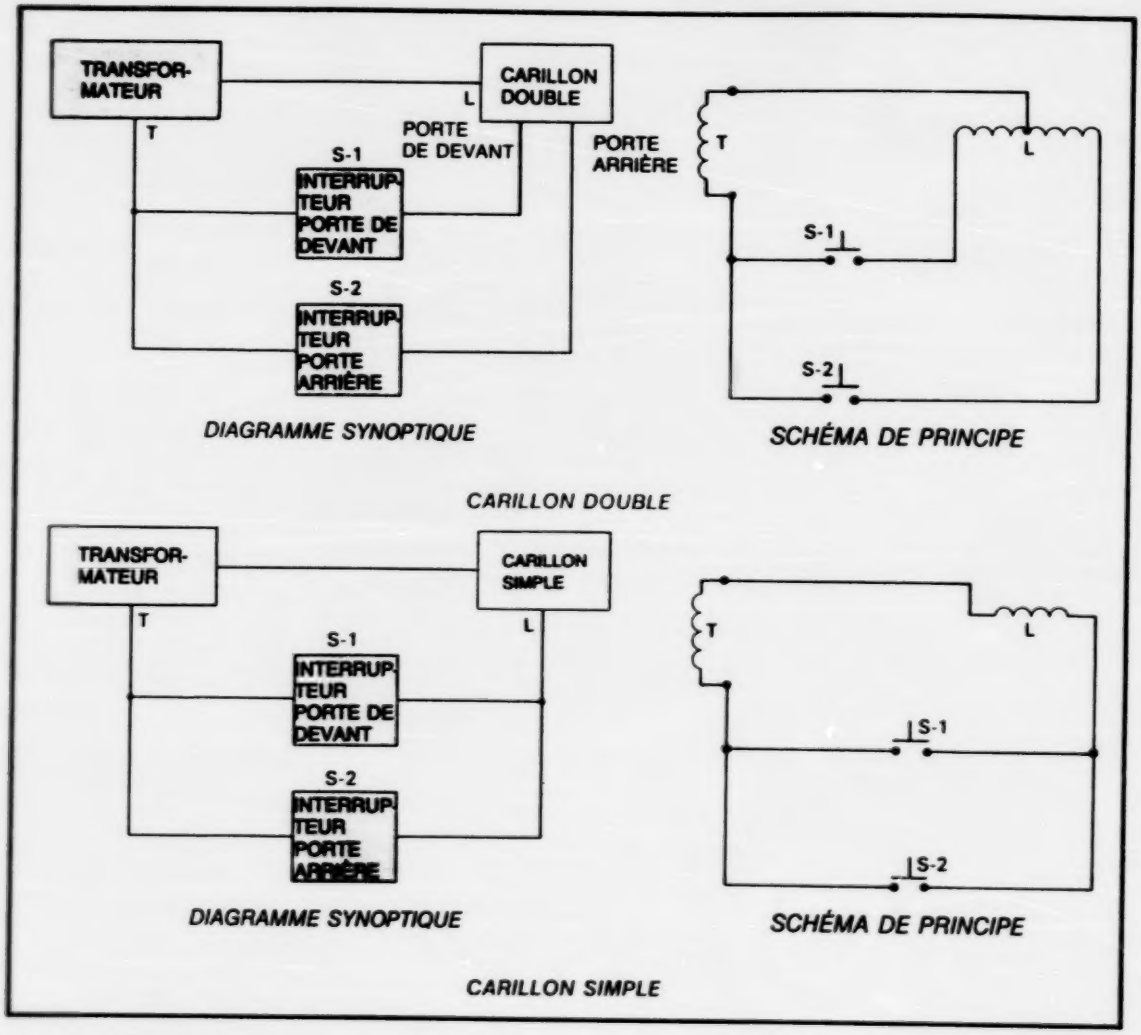


Fig. 16. Les raccordements du secondaire du transformateur pour un circuit de carillon de porte sont représentés sous forme simplifiée et schématique. Le carillon double peut être raccordé de manière à émettre une double note pour la porte de devant et une seule note pour la porte arrière.

Des circuits semblables aux circuits de carillon de porte représentés à la **figure 16** sont installés dans un grand nombre d'usines pour transmettre des signaux d'une zone à l'autre. Le transformateur, qui sert ici de source à basse tension alternative, pourrait être remplacé par les batteries d'accumulateurs à c.c. utilisées pour les systèmes de secours.

23 Circuits de commande

En dehors des lignes d'alimentation et des dérivations, les circuits de commande sont les circuits les plus importants pour lesquels un

électricien d'entretien est appelé à intervenir. C'est pour cette raison que vous devez avoir une *bonne* connaissance de base en électricité et être capable de lire et d'utiliser les schémas d'un circuit de commmande. Certains circuits de commande sont très simples, d'autres sont beaucoup plus complexes.

De nombreux appareils électroménagers et tous les équipements électriques industriels renferment des circuits de commande. La figure 17 représente le schéma simplifié d'un climatiseur domestique. Les deux charges principales du circuit sont le compresseur et le moteur du ventilateur. Les autres dispositifs électriques du circuit, soit l'interrupteur, le thermostat et les deux condensateurs, sont des dispositifs de commande. Ce sont eux qui déterminent à *quel moment* et *pendant* combien de temps les charges électriques doivent fonctionner.

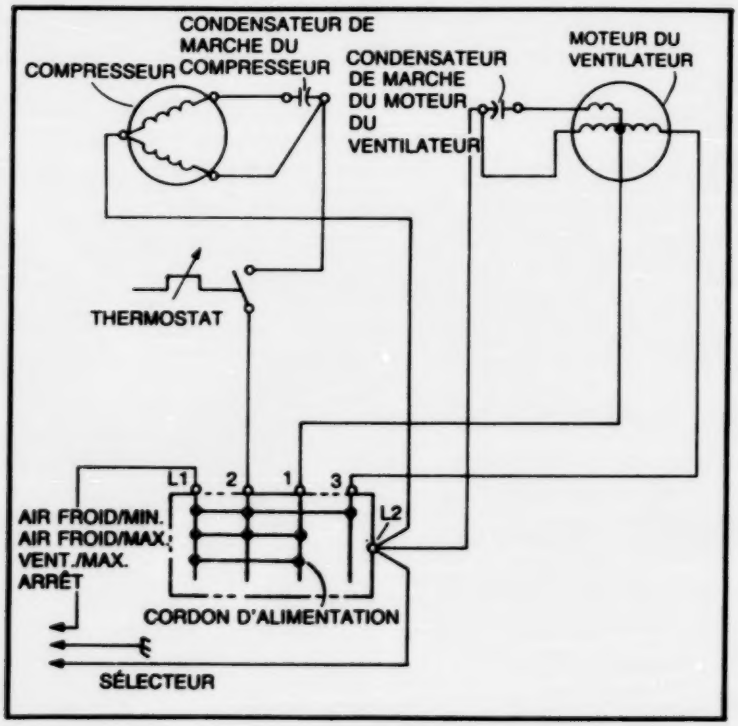


Fig. 17. Dans ce schéma de commande de climatiseur, les gros points noirs du sélecteur indiquent les connexions à mettre sous tension selon les différents modes de fonctionnement. Par exemple, pour la position VENT. MAX., vous noterez que la borne de la ligne L1 est uniquement raccordée à la borne 1 qui alimente le moteur du ventilateur.

Les circuits de commande des machines industrielles sont en général plus complexes. La **figure 18** représente une partie du schéma de commande d'une machine de grande puissance. Les trois moteurs constituent les charges électriques principales. Ils sont alimentés par une source triphasée de 460 V, 40 A. Le circuit de commande fonctionne sous 115 V.

Dans la plupart des machines de cette puissance, le circuit de commande fonctionne sous une tension inférieure à celle alimentant les charges principales. Dans d'autres machines, les circuits de com-

mande sont à la fois électriques et électroniques. Par conséquent, l'entretien et le dépannage des circuits de commande industriels sont généralement effectués par un électricien ayant été formé sur place et ayant une bonne connaissance théorique des principes électriques en question.

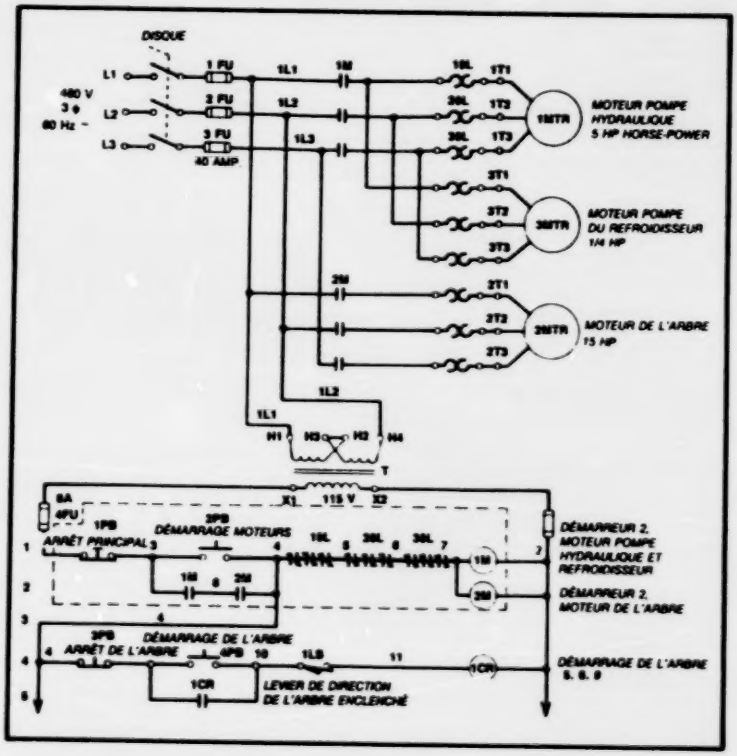


Fig. 18. Cette partie du circuit de commande d'une foreuse automatique est alimentée par le transformateur *T*. Le circuit de commande est un circuit monophasé à deux fils de 115 V, sans mise à la terre. Les composants placés à l'intérieur du rectangle rouge en pointillés commandent les moteurs.

24 Éléments communs à tous les circuits

Les circuits peuvent avoir des noms différents, mais un circuit reste toujours un circuit. Quel que soit le nom qui le désigne, chaque type de circuit ou groupe de circuits comprend une *source d'alimentation*, *des conducteurs* et une *charge électrique*. En plus de ces éléments, un circuit contient en général des dispositifs de *protection* et de *commande*.

Avec l'expérience, vous serez vous aussi capable de décrire les différents types de circuits et leurs caractéristiques, comme nous l'avons fait dans ce module.

Exercice de contrôle 3

Vous allez maintenant faire une pause de quelques minutes qui vous permettra de revoir certains points-clés avant de répondre à l'examen personnel. Comparez vos réponses aux nôtres et révisez, au besoin, les notions qui ne vous sont pas claires.

1. Les circuits industriels sont généralement des circuits (monophasés, triphasés) _____.
2. Quels sont les trois types de circuits d'après les sous-divisions d'un système?
3. Dans le circuit électrique industriel représenté à la figure 14, les circuits qui alimentent les transformateurs sont appelés _____ .
   A. circuits de commande
   B. lignes d'alimentation
   C. lignes d'alimentation secondaires
   D. dérivations
4. Lorsque vous parlez d'un circuit de radiateur électrique ou de moteur, vous le désignez selon le type de _____ qu'il alimente.
5. Citez deux types de circuits spéciaux ou auxiliaires.
6. Lorsque vous installez un système électrique dans une zone dangereuse, vous devez prévoir des dispositifs et des accessoires _____ .
7. Quels sont les composants qui commandent les charges du circuit représenté à la figure 17?

Vos réponses

1. _____
2. _____
   _____
   _____
3. _____
4. _____
5. _____
   _____
6. _____
7. _____
   _____
   _____
   _____

Réponses aux questions de l'exercice de contrôle 3

1. triphasés Section 18
2. lignes d'alimentation
   lignes d'alimentation secondaires
   dérivations Section 19
3. C lignes d'alimentation Section 20
   secondaires figure 14
4. charge ou d'équipement Section 21
5. Circuits de secours
   Circuit alimentant une zone dangereuse Section 22
   (Autres exemples: circuit d'alarme, circuit de télécommunications et circuit de commande.)
6. antidéflagrants Section 22
7. Compresseur
   Condensateur de marche du compresseur
   Condensateur de marche du moteur de ventilateur
   Thermostat
   Sélecteur Section 23, figure 17

Examen personnel

Lisez attentivement chacune des phrases suivantes et assurez-vous que vous en comprenez bien le sens. Chaque phrase est suivie de quatre mots ou groupes de mots dont un seul est correct. Faites un X sur la lettre correspondant à votre réponse.

1. Le trajet complet d'un courant électrique est appelé:
   - **A.** système électrique.
   - **B.** circuit électrique.
   - **C.** composant électrique
   - **D.** appareillage électrique.

2. Les composants électriques nécessaires à l'établissement d'un circuit sont:
   - **A.** une source d'alimentation, une charge et un interrupteur.
   - **B.** un interrupteur, une source d'alimentation et des conducteurs.
   - **C.** un interrupteur, des conducteurs et une charge.
   - **D.** une source d'alimentation, des conducteurs et une charge.

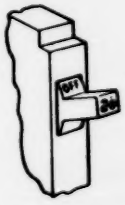
3. Lequel des dispositifs suivants représente une prise de courant?

   A.

   C.

   B.

   D.

4. Lorsqu'un circuit est désigné comme étant un circuit triphasé de 240 V monté en triangle, il est défini selon:
   - **A.** le type de charge qu'il alimente.
   - **B.** le type d'abonné qui l'utilise.
   - **C.** ses caractéristiques.
   - **D.** ses fonctions.

5. Dans un circuit série, la grandeur électrique commune à tous les composants est:

   A. l'intensité.
   B. la tension.
   C. la résistance.
   D. la puissance nominale.

6. Vous travaillez comme électricien dans une usine moderne d'une grande ville. Le système polyphasé utilisé dans votre usine est probablement:

   A. un système monophasé.
   B. un système biphasé.
   C. un système triphasé.
   D. un système tétraphasé.

7. Si, dans un circuit monté en étoile, la tension phase-neutre est de 240 V, la tension ligne à ligne sera d'environ:

   A. 120 V
   B. 208 V
   C. 240 V.
   D. 416 V.

8. Un circuit dit «résidentiel» a probablement les caractéristiques suivantes:
   A. 120/240 V, monophasé.
   B. 480 V, monophasé.
   C. 208 V, triphasé, monté en triangle.
   D. 240 V, triphasé, monté en étoile.

9. Normalement, lorsque vous entendez un collègue parler d'un circuit de moteur, vous savez qu'il s'agit:

   A. d'une ligne d'amenée de courant.
   B. d'une dérivation.
   C. d'une ligne d'alimentation.
   D. d'une ligne d'alimentation secondaire.

10. La tension du circuit de commande de la machine industrielle représentée à la figure 18 alimente les bornes:

    A. 1L2 et 1L3
    B. 1T1 et 1T2
    C. 1M et 2M
    D. X1 et X2

Les réponses sont données à la page 338.

Types de circuits électriques

AF0208

(Lexiques)

Français	Anglais
Antidéflagrant	Explosion-proof
Arrêt de l'axe	Spindle stop
Barre oblique	Slant line
Batterie d'accumulateurs	Battery pack
Câble armé	Armor-sheated cable
Canalisation de câbles	Cablebus
Centre de distribution	Load center
Centre de distribution	Distribution center
Charge	Load
Châssis	Frame (of motor)
Circuit d'alimentation	Feeder circuit
Circuit d'alimentation secondaire	Subfeeder circuit
Circuit d'interrupteur	Switch circuit
Circuit d'utilisation	Load circuit
Circuit de commande	Control circuit
Circuit de dérivation	Branch circuit
Circuit de distribution trois-fils	3-wire service
Circuit de télécommande	Remote control circuit
Circuit fermé	Closed path circuit
Circuit mis à la terre	Grounded circuit
Circuit monté en étoile	Wye-connected circuit
Circuit monté en triangle	Delta-connected circuit
Climatisateur domestique	Home air-conditionner
Compresseur d'air	Air compressor
Conducteur de branchement	Service conductor
Conduite semi-rigide	Intermediate conduit
Cordon d'alimentation	Line cord
Couplage	Wiring connection
Courant de fuite (à la terre)	Fault current
Dérivation	Branch circuit
Fiche mâle	Plug (mating)
Fiche mâle	Mating plug
Fil de terre	Grounding conductor
Fil identifié	Load feed
Fil mis à la terre	Grounded conductor
Fil neutre	Neutral wire
Fil sous tension	Hot wire
Fil voyageur	Traveler
Groupe diésel	Diesel powered generator
Intensité admissible	Current-carrying capacity
Interrupteur à 3 directions	3-way switch
Interrupteur bidirectionnel	Two-switch
Ligne à ligne	Line to line
Mettre en dérivation	Shunt (to)
Mettre en parallèle	Shunt (to)
Mise à la terre	Grounding

Anglais	Français
Air compressor	Compresseur d'air
Armor-sheated cable	Câble armé
Battery pack	Batterie d'accumulateurs
Branch circuit	Circuit de dérivation
Cablebus	Canalisation de câbles
Center top	Prise médiane
Chime	Sonnerie
Closed path circuit	Circuit fermé
Compound	Mixte
Control circuit	Circuit de commande
Current-carrying capacity	Intensité admissible
Delta-connected circuit	Circuit monté en triangle
Diesel powered generator	Groupe électro-diésel
Distribution center	Centre de distribution
Electric dryer	Sécheuse
Explosion-proof	Antidéflagrant
Fault current	Courant de fuite (à la terre)
Feeder circuit	Circuit d'alimentation
Frame (of motor)	Châssis
3-way switch	Interrupteur à 3 directions
3-wire service	Circuit de distribution trois-fils
Ground	Prise de terre
Grounded circuit	Circuit mis à la terre
Grounded conductor	Fil mis à la terre
Grounded neutral	Neutre à la terre
Grounding	Mise à la terre
Grounding conductor	Fil de terre
Home air-conditionner	Climatiseur domestique
Hot wire	Fil sous tension
Intermediate conduit	Conduite semi-rigide
Line cord	Cordon d'alimentation
Line to line	Ligne à ligne
Line to neutral	Phase-neutre
Load	Charge
Load	Récepteur
Load center	Centre de distribution
Load circuit	Circuit d'utilisation
Load feed	Fil identifié ou de retour
Wating plug	Fiche mâle
Mode switch	Sélecteur
Neutral wire	Fil neutre
Operating voltage	Tension de service
Outlet	Sortie
Panelboard	Panneau de distribution
Plug (mating)	Fiche mâle
Receptacle	Prise de courant
Remote control circuit	Circuit de télécommande

Français	Anglais
Mixte	Compound
Montage	Wiring connection
Monter en dérivation	Shunt (to)
Neutre à la terre	Grounded neutral
Neutre continu	Solid neutral
Neutre non mis à la terre	Ungrounded neutral
Panneau de distribution	Panelboard
Phase-neutre	Line to neutral
Prise de courant	Receptacle
Prise de terre	Ground
Prise médiane	Center top
Raccordement	Wiring connection
Récepteur	Load
Charge	Load
Sécheuse	Electric dryer
Sélecteur	Mode switch
Sonnerie	Chime
Sortie	Outlet
Système de câblage	Wiring system
Tension de service	Operating voltage

Anglais	Français
Service conductor	Conducteur de branchement
Shunt (to)	Mettre en dérivation
Shunt (to)	Mettre en parallèle
Shunt (to)	Monter en dérivation
Slant line	Barre oblique
Solid neutral	Neutre rigide
Spindle stop	Arrêt de l'axe
Subfeeder circuit	Circuit d'alimentation secondaire
Switch circuit	Circuit d'interrupteur
Traveler	Fil voyageur
Two-way switch	Interrupteur bipolaire
Ungrounded neutral	Neutre isolé
Wiring connection	Couplage
Wiring connection	Montage
Wiring connection	Raccordement
Wiring system	Systême de câblage
Wye-connected circuit	Circuit monté en étoile

Réponses à l'examen personnel et références
(AF0201)

Question	Réponse	Référence
1	A	Section 2
2	D	Section 3, figure 1
3	B	Section 9, figure 4
* 4	B	Sections 14, 15 voir problème 2
* 5	D	Sections 14, 15 voir problème 3
6	D	Section 15
7	A	Section 19
8	C	Section 28
9	B	Section 30, figure 16(b)
* 10	C	Section 31, voir problème

*** Solutions**

4. $E = 0{,}707 \times E_{max} = 0{,}707 \times 100 = 70{,}7$ V

5. $P = I^2R = 20 \times 20 \times 5 = 2000$ W

10. $P = 1{,}732 \times E \times I \times \text{fp}$
$= 1{,}732 \times 220 \times 5 \times 0{,}7$
$= 1333{,}6$ ou 1335 W (approx.)

Réponses à l'examen personnel et références
(AF0202)

Question	Réponse	Référence
1	A	Sections 1, 2, figure 1(*a*)
2	B	Section 3
3	D	Section 9, figure 5
4	C	Section 15
5	D	Section 17, tableaux 1-3
6	C	Section 22, tableau 4
7	B	Section 27
8	B	Section 30
9	A	Section 32
10	D	Section 33

Réponses à l'examen personnel et références
(AF0203)

Question	Réponse	Référence
1	B	Section 1
2	C	Section 2
3	B	Section 2
*4	C	Section 5
*5	A	Section 7
6	C	Section 12
*7	B	Section 15
8	A	Section 19
9	D	Section 25
10	D	Section 29

*** Solutions**

4. $\frac{N_p}{N_s} = \frac{1}{2} = 1{:}2$

$E_s = 2 \times 60 = 120$ V

5. $I_p = \frac{E_s}{E_p} \times I_s = \frac{50}{250} \times 10 = 2$ A

7. $1{,}73 \times 10 = 17{,}3$ A

Réponses à l'examen personnel et références
(AF0204)

Question	Réponse	Référence
1	B	Sections 1, 2
2	B	Section 6
3	C	Section 7
4	D	Section 8, figure 5
5	C	Section 11
*6	A	Section 16
*7	B	Section 17
8	C	Section 22
9	A	Section 24
*10	B	Section 32

*** Solutions**

6. $\tau = \frac{L}{R} = \frac{15}{5} = 3\ \text{s}$

8. $C_T = C_1 + C_2$
$= 18 + 6 = 24\ \mu\text{F}$

10. $\tau = RC = 2500\ \Omega \times 200\ \mu\text{F} = 2500 \times 0{,}002 = 0{,}5\ \text{s}$

Réponses à l'examen personnel et références
(AF0205)

Question	Réponse	Référence
1	B	Section 2
2	D	Section 4, 5
3	C	Section 6
4	A	Section 7
5	A	Section 9
6	C	Section 11, fig. 8(b)
7	D	Sections 11, 12
8	A	Section 14
9	C	Section 16, fig. 10
10	D	Section 17, fig. 11

Réponses à l'examen personnel et références

(AF0206)

Question	Réponse	Référence
1	C	Section 16
2	C	Section 19
3	C	Section 20, figure 14
4	B	Section 22
5	D	Section 28, figure 18
6	A	Section 29
7	B	Section 32
8	A	Section 36, figure 21
9	D	Section 37
10	D	Section 37

Réponses à l'examen personnel et références
(AF0207)

Question	Réponse	Référence
1	B	Section 1
2	D	Section 3
3	A	Section 6
4	C	Section 7
5	A	Section 9
6	D	Section 11
7	B	Section 13
8	D	Section 15, figure 10
9	C	Section 20
10	A	Section 21

Réponses à l'examen personnel et références
(AF0208)

Question	Réponse	Référence
1	B	Section 1
2	D	Section 2
3	A	Section 3, figure 2
4	C	Section 4
5	A	Section 5
6	C	Section 13
* 7	D	Section 15
8	A	Section 18
9	B	Section 21
10	D	Section 23, figure 18

*** Solution**

7. 1,732 × 240 = 416 V

Principes et composants du courant alternatif

Index alphabétique

Abaisseur (transformateur) / *113-117*
Accord / *193*
Accorder / *198*
Accumulateurs / *309-322*
Alimentation (ligne d') / *319*
Alimentation de secours / *322*
Alimentation secondaire (ligne d') / *319*
Alternance / *19-21*
Alternateur / *13-16-49-65-97-160*
Alternateur élémentaire / *16*
Alternateurs en parallèle / *93*
Alternateurs en série / *93*
Amortisseur / *79*
Ampères (A) / *117*
Ampères-tours (A.T.) / *118*
Amplificateur magnétique / *138*
Amplification / *219-233*
Amplitude / *18*
Angle de phase ϕ / *32-48-158-172-191-197*
Anode (A) / *214-226-235*
Appareillage d'utilisation / *261-264*
Armature / *130*
Askarel / *131*
Atmosphère corrosive / *139*
Atténuation / *201*
Auto-induction / *152*
Automatismes / *220*
Autotransformateur / *134*
Avance / *192*

Bagues collectrices / *17-75-80*
Baladeur / *272*
Balais / *17-75-80*
Balais amovibles / *134*
Bandes codées / *174*
Barre omnibus / *271-309-319*
Barrière de potentiel / *225*
Base (B) / *230*
Basse tension / *130-280-322*
Bistable / *235*
Bobine (L) / *49-111-151-188*
Bobine à air / *153-160*
Bobine à noyau de fer / *153*
Bobine à saturation / *137*
Bobine de filtrage / *137-244*
Bobine d'arrêt / *136-160-242*
Bobines d'induction / *17*
Boucle / *278*
Branchement $\gamma\gamma$ / *124*
Branchement $\Delta\Delta$ / *125*
Branchements / *125-127*
Branches / *196-305*

Câble aérien / *281*
Câble armé / *319*
Câble sous gaine de plomb / *282*
Câble sous gaine non métallique / *319*
Calibre / *314*
Can com nég (condensateur) / *175*
Canalisation / *261-271*
Canalisation de câbles / *271*
Caniveaux auxiliaires / *271*
Capacité (C) / *170*
Caractéristiques d'un circuit / *301*
Catégories de circuits / *302*
Cathode (K) / *214-226-235-239*
Cellule photo-électrique / *280*
Centrale (la) / *74-287*
Centre de distribution / *277-320*
Champ magnétique / *112-118-151*
Charge (condensateur) / *137*
Charge d'espace / *216-225*
Charge électrique / *166-259-264-300-306-314-325*
Charge monophasée / *51*
Chemin de câble / *271*
Chercheur (diode à cristal) / *226*
Chocs électriques / *315*
Circuit 120 V/240 V / *309*
Circuit à c.a. / *23*
Circuit à trois fils / *309*
Circuit bouchon / *198*
Circuit capacitif / *191*

Circuit de dérivation / 299
Circuit de secours / 309
Circuit de sortie / 232
Circuit d'alimentation / 242
Circuit d'alimentation pleine-onde / 242
Circuit d'entrée / 232
Circuit d'utilisation / 299
Circuit électrique / 299-301
Circuit fermé / 214-306
Circuit inductif / 188-191
Circuit intégré (CI) / 234
Circuit LC / 192
Circuit magnétique / 71
Circuit ouvert / 198-304
Circuit parallèle / 196
Circuit RC / 171-190-204
Circuit RL / 158-190-204
Circuit RLC / 190
Circuit réactif / 32
Circuit redresseur demi-onde / 239
Circuit redresseur triphasé / 247-311
Circuit résistif / 157
Circuit série / 187-196
Circuit simple / 266
Circuit triphasé / 123
Circuit universel / 265
Circuits de commande / 329
Circuits éliminateurs / 203
Circuits industriels / 44-130-319
Circuits réactifs / 39
Circuits résonnants / 198
Circuits spéciaux / 321
Climatiseur domestique / 324
Coefficient de qualité (Q) / 175-204
Coefficient de surtension (Q) / 162-199
Collecteur (C) / 226-230
Commande (dispositif de) / 300-325
Communs (fils) / 305
Commutateur à trois directions / 307
Composant / 299
Condensateur / 36-137-166-170-189-198-239
Condensateur de filtrage / 241
Condensateur de sortie / 241
Condensateur d'entrée / 241
Conducteurs / 259-271-300-325
Constante de temps (T) / 162-176-189
Constante diélectrique (K) / 167
Contrôleur / 261-266
Convertisseur / 309
Cosinusphimètre / 42-43-94
Couches (circuits intégrés) / 234
Coulomb (C) / 166
Couplage (voir branchement) / 78
Courant / 117-189-196-304-309
Courant alternatif / 13-20-29-65-259-284-308
Courant continu pulsé / 136-217-240
Courant conventionnel / 13-151
Courant de phase / 51
Courant de plaque / 220
Courant de secteur / 51
Courant direct / 235
Courant de Foucault / 87
Courbe sinusoïdale / 65
Court-circuit / 194-266-315
Cuirassé (transformateur) / 130
Culasse / 70-130
Cycle / 16-18-21-66-68

Décharge (condensateur) / 137-241
Déconnecté / 304
Défauts / 139
Démarrage / 92
Déphasage / 36-44-150-159-187-189-191-197
Dérivation / 260-265-320
Détenteur / 138
Diagramme schématique / 266
Diagramme synoptique / 266
Diélectrique / 166-173
Diffuser / 225
Diode / 215-218
Diode à cristal / 226
Diode à pointes / 226
Diode au silicium / 227
Diode semi-conductrice / 213
Diode Zener / 227
Disjoncteur / 264-287-300-315
Dispositif / 261
Dispositif antidéflagrant / 322
Dispositif électrique / 300
Dispositif électronique / 213
Distribution aérienne / 282
Distribution souterraine / 282
Dopage / 224
Durée de vie / 227

Éclairage / 268
Effet Joule / 87-120
Effets inductifs / 152
Électricité statique / 282
Électrodes / 214

Électrolytiques */ 175*
Électrons */ 214-218-231*
Électro-aimants */ 71*
Élévateur (transformateur) */ 113-117*
Éliminateur de bande (filtre) */ 203*
Émetteur (E) */ 226-230*
Émission d'électrons */ 214*
Énergie */ 264-300*
Enregistreur */ 273*
Enroulement */ 50*
Enroulement primaire */ 111-115-126-134*
Enroulement secondaire */ 111-115-126*
Entrefer */ 71*
Entretien */ 92-95*
Équilibrage (des charges) */ 312*
Équipement */ 261*
Équipement électrique */ 299*
Excitatrice */ 75-92*

Facteur de dissipation (D) */ 175*
Facteur de puissance (fp) */ 34-42-44-83-158-171*
Faible puissance */ 224*
Farad (F) */ 167*
Ferrite */ 161*
Feuilleté (circuit magnétique) */ 129*
Fiche */ 300*
Fil chargé */ 307*
Fil de terre */ 306*
Fil neutre */ 51-305-307-309*
Fil sous tension */ 306-309*
Fil voyageur */ 307*
Filament */ 214*
Filtrage */ 136-248*
Filtre à bobine en tête */ 1243-246*
Filtres */ 201-239-241*
Fission atomique */ 285*
Fixe (condensateur) */ 174*
Fluctuation de vitesse */ 79*
Fluctuation rémanente */ 241*
Flux */ 66-112*
Flux de courant */ 225*
Flux magnétique */ 153*
Force contre-électromotrice (f.c.é.m.) */ 152*
Force électromotrice (f.é.m.) */ 13-151*
Force magnétomotrice */ 118*
Foucault (courants de) */ 119-129*
Francis (turbine) */ 98*
Fréquence */ 20-66-68-201-284*
Fréquence de résonance (fr) */ 93-198*
Fréquence d'ondulation */ 245-248*
Fréquences audio */ 135*
Fréquences radio */ 135*
Fusible */ 267-300-306-310-315*
Fusion atomique */ 285*

Gâchette */ 235-236*
Gaines de distribution */ 273*
Générateur de vapeur */ 284*
Générateurs (d'électricité) */ 283*
Génératrice */ 13*
Germanium */ 223-234*
Gradient de potentiel */ 225*
Graphite */ 80*
Grille */ 218*

Haute puissance */ 224*
Haute tension */ 130*
Hautes fréquences */ 154*
Henry (H) */ 153-157-224*
Hertz (Hz) */ 20-66-157-193*
Hexapolaire */ 67*
Hors tension */ 304*
Humidité */ 139*
Hypothénuse */ 160*
Hystérésis */ 119*

Impédances (Z) */ 32-43-159-172-191-198*
Impuretés */ 224*
Inductance mutuelle */ 112*
Inductance variable */ 161*
Inductance (L) */ 32-136-153-162-188-198*
Inducteur */ 36-69-74*
Induction électromagnétique */ 15-112-151-198*
Induction électrostatique */ 199*
Induction mutuelle */ 151*
Induit */ 74*
Industrielle (installation) */ 309-316-319*
Intensité admissible */ 308*
Intensité du champ magnétique */ 67*
Interconnexions */ 282*
Interrupteur */ 300-306-310*
Interrupteur fermé */ 306*
Interrupteur ouvert */ 306*
Ion positif */ 216*
Ionisation */ 217*
Isolation */ 87-138*

Jonction P-N */ 224*

Kva */ 139*

Laiton */ 161*
Ligne à basse tension */ 274*
Ligne à haute tension */ 274-282*
Ligne d'alimentation */ 262-268-274*
Lignes de force */ 17-129-151*
Lignes de transport */ 171*
Loi d'Ohm */ 157-171-187-190-197*

MFD */ 175*
Machines industrielles */ 324*
Main droite (règle) */ 15*
Marche à vide */ 116*
Marche en charge */ 116*
Matériau magnétique */ 153*
Mica */ 167*
Mis à la terre */ 314*
Mixtes (montages) */ 305*
Monophasé (circuit) */ 32-310*
Montage en étoile (γ) */ 50-78-248-311*
Montage en triangle (△) */ 78-311*
Moteur c.a. */ 158-160*
Moteur primaire */ 65-76*
Moyenne puissance */ 224*

NPN (transistor) */ 233*
Neutre (transformateur) */ 126*
Neutre continu */ 310-313-315*
Niveau de déphasage */ 160*
Nombre de phases */ 320*
Nombre de tours */ 114*
Noyau laminé */ 160*
Noyau magnétique */ 111-129*
Noyau plongeur */ 161*

Ohms (Ω) */ 156-159*
Onde sinusoïdale */ 18-21-29-36*
Ondes */ 157-170*
Ondulation */ 137-240-248*
Opposition au flux de courant */ 170*
Oxyde de cuivre */ 223*

PNP (transitor) */ 233*
Panneau de distribution */ 261-265-267*
Panneaux de commande */ 261-273*
Parallèle (montage) */ 123-168-304*
Passe bande (filtre) */ 202*
Passe bas (filtre) */ 201*
Passe haut (filtre) */ 202*
Pelton (turbine) */ 98*
Perméabilité */ 153*
Perte dans le fer */ 119-78*
Perte de puissance */ 119-14*
Pertes */ 119-162-176-282*
Phase */ 35-125-192-313*
Plaques */ 166-215*
Points de dérivation */ 196*
Polarisation */ 218-231*
Polarisation directe */ 225*
Polarisation inverse */ 225*
Polarité */ 123*
Pôles saillants */ 75-79*
Polyphasé (circuit) */ 32-48-68*
Porteurs de charge */ 231*
Poste de distribution */ 275*
Poteaux */ 280*
Prise de courant */ 262*
Prise médiane */ 242-312*
Protection */ 300-321-325*
Puce monocristalline */ 227*
Puissance */ 37-52-116-264*
Puissance active */ 34-40-42-44-83*
Puissance apparente */ 41-44*
Puissance négative */ 40*
Puissance positive */ 40*
Puissance réactive */ 41-91*
Puit d'accès */ 283*
Pulsation */ 241*
Purificateurs */ 88*
Pylône */ 282*

Quadripolaire */ 67*

Racine carrée */ 197*
Radiateur */ 138*
Réactance */ 39-137-157-244*
Réactance capacitive (X_C) */ 32-36-170-175-189-198-201*
Réactance inductive (X_L) */ 32-36-45-156-159-188-198-201*
Réacteur nucléaire */ 284*
Réacteurs shunt */ 45*
Réchauffement */ 215*
Redressement */ 213*
Redresseur */ 136-217-227*
Redresseur commandé au silicium (SCR) */ 234*
Redresseur demi-onde */ 217-241*
Redresseur en pont */ 246*
Redresseur pleine onde */ 218-245*
Règle des carrés */ 159-172*
Règles des jonctions P.N. */ 225-226*
Règles de montage */ 307*

Régulateur */ 91*
Régulateur de tension */ 273*
Régulateur de vitesse */ 85-94*
Régulation */ 77-84-120-137-226-246*
Régulation de vitesse */ 98*
Relais */ 220*
Relais thermiques */ 267*
Rendement */ 119-127-248*
Réponse de fréquence */ 204*
Réseau cristallin */ 224*
Réseau électrique */ 274*
Réseau en étoile primaire */ 275-277*
Réseau en étoile primaire bouclé */ 278-321*
Réseau en étoile simple classique */ 275-276*
Réseau haute-tension */ 310*
Réseau secondaire */ 260*
Résidentielle (installation) */ 309-316*
Résistance (R) */ 32-159-162-187-199-231-304-308*
Résistance de filtrage */ 241*
Résistance de fuite */ 204*
Résonance */ 193*
Retard */ 156-158-162-189-192*
Rhéostat */ 92*
Rhéostat de champ */ 84*
Rigidité diélectrique */ 167*
Rotor */ 69-74-78-100*
Rotor cylindrique */ 79-99*

Sectionneur */ 262-266*
Sécurité */ 315*
Sélecteur */ 135*
Sélection de fréquence */ 193*
Sélénium */ 224*
Semiconducteur */ 213-223*
Série (montage) */ 168-172-191-304*
Shunt */ 202*
Signaux BF */ 201-204*
Signaux HF */ 201-204*
Silicium */ 223-227-234*
Sonorisation (circuit de) */ 139*
Source d'alimentation */ 299-325*
Sources d'énergie */ 259-285*
Sous-division (du système électrique) */ 319*
Sous-station */ 281-287*
Spires */ 113-67-153*
Stator */ 69-74-78-100*
Stratifié */ 77*
Substance magnétique */ 151*
Substrat */ 234*
Surcharge */ 87*
Surcharge électrique */ 267*
Symbole */ 111-124-160-226*
Synchrone */ 93*
Synchronoscope */ 94*
Système biphasé */ 48*
Système électrique */ 91*
Système équilibré */ 48-51*
Système triphasé */ 48*

Température */ 86-227*
Temps en degrés */ 21-158*
Tension */ 157-259-304-312*
Tension alternative */ 18-239*
Tension continue négative */ 241*
Tension continue positive */ 241*
Tension crête-à-crête */ 24-26*
Tension c.a. */ 37*
Tension de phase */ 51-78*
Tension de sécurité maximale */ 51*
Tension d'amorçage directe */ 235*
Tension de secteur */ 50-52*
Tension de service */ 174-308-320*
Tension efficace */ 24-27*
Tension induite */ 18-66-112-134*
Tension maximale */ 24-26-28*
Tension moyenne */ 24-27*
Tension nominale */ 84-306*
Tension primaire */ 113*
Tension secondaire */ 113*
Termes descriptifs du circuit */ 301*
Thermostat */ 280-324*
Thyratrons */ 220*
Thyristor */ 234*
Tolérance */ 174*
Transformateur */ 111-113-259-274-280-287-300-310-312*
Transformateur à l'askarel */ 268*
Transformateur à l'huile */ 268*
Transformateur de distribution */ 132*
Transformateur de mesures */ 132*
Transformateur de puissance */ 130-242*
Transformateur élévateur */ 14*
Transformateur extérieur */ 269*
Transformateur monophasé */ 127*
Transformateur sec */ 268*
Transformateur triphasé */ 127-130*
Transformateurs spéciaux */ 135*
Transistor */ 213-230*
Transport de l'énergie */ 282*
Triac */ 234*

Triangle d'impédance */ 160-172*
Triode */ 218*
Trous */ 224-231*
Tube à vide */ 213*
Turbine */ 98-284*
Turbo-alternateur */ 86*
Turbo-génératrice */ 99*
Types de bobines */ 160*
Types de condensateurs */ 173*

Unités de mesure */ 167*
Uranium */ 289*

Valeur de crête */ 241*
Valeur instantanée */ 16-25*
Valeur maximale */ 16*
Valeur R.M.S. */ 30*
Valeurs c.a. */ 24*
Valeurs efficaces */ 39*
Valeurs nominales */ 83-139*
Valves */ 215*
Vapeur de mercure */ 216*
Variable (condensateur) */ 174*
Variation de signal */ 138*
Variation de tension */ 189*
Ventilation */ 87-100-138*
Vibrations */ 139*
Vitesse de coupe */ 67*
Volts (V) */ 117*
Volt-ampère réactif (VAR) */ 41*
Volt-ampère (VA) */ 41-119*
Voyants lumineux */ 280*

Watt (W) */ 41-117*
Wattheuremètre */ 273*

DE L'ÉLECTRON AU MICROPROCESSEUR

8015 Principes du courant continu
8016 Principes et composants du courant alternatif
8017 Appareils et mesures électriques
8018 Appareillage électrique
8020 Mesures électroniques et instrumentation
8021 Circuits réactifs
8022 Composants électroniques
8023 Circuits électroniques de base
8024 Systèmes électroniques
8025 Dépannage d'appareils et systèmes électroniques
8026 Circuits impulsionnels
8027 Circuits logiques
8028 Circuits intégrés linéaires et numériques
8029 Systèmes d'ordinateurs industriels de base
8030 Introduction aux microprocesseurs
8031 Application des microprocesseurs
8032 Instrumentation et contrôle électroniques
8033 Applications de circuits électroniques industriels
8034 Applications de systèmes électroniques industriels de base
8035 Techniques avancées de dépannage

Gouvernement du Québec
Direction des cours par correspondance

Imprimé au Québec, Canada